

UNIVERSIDADE FEDERAL DE JUIZ DE FORA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

EDILENE SILVA NEVES

APLICAÇÃO DA MANUTENÇÃO CENTRADA NA CONFIABILIDADE COMO
FERRAMENTA DE MELHORIA DE PERFORMANCE NUM SETOR DE INDÚSTRIA
METALÚRGICA DE GRANDE PORTE DO SUDESTE DE MINAS
GERAIS

JUIZ DE FORA

2016

EDILENE SILVA NEVES

APLICAÇÃO DA MANUTENÇÃO CENTRADA NA CONFIABILIDADE COMO
FERRAMENTA DE MELHORIA DE PERFORMANCE NUM SETOR DE INDÚSTRIA
METALÚRGICA DE GRANDE PORTE DO SUDESTE DE MINAS
GERAIS

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Faculdade de Engenharia da Universidade
Federal de Juiz de Fora, como requisito parcial para a obtenção do título de Engenheira
Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Luiz Henrique Dias Alves

Co-orientador: Eng. Hudson Valério Natividade

JUIZ DE FORA

2016

Ficha catalográfica elaborada através do programa de geração automática da Biblioteca Universitária da UFJF, com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

Silva Neves, Edilene.

APLICAÇÃO DA MANUTENÇÃO CENTRADA NA CONFIABILIDADE COMO FERRAMENTA DE MELHORIA DE PERFORMANCE NUM SETOR DE INDÚSTRIA METALÚRGICA DE GRANDE PORTE DO SUDESTE DE MINAS GERAIS / Edilene Silva Neves. -- 2016.

70 p.

Orientador: Luiz Henrique Dias Alves

Coorientador: Hudson Valério Natividade

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) - Universidade Federal de Juiz de Fora, Faculdade de Engenharia, 2016.

1. Manutenção . 2. Confiabilidade. 3. Weibull. 4. Turbina a vapor. 5. Indústria metalúrgica. I. Dias Alves, Luiz Henrique, orient. II. Valério Natividade, Hudson, coorient. III. Título.

EDILENE SILVA NEVES

APLICAÇÃO DA MANUTENÇÃO CENTRADA NA CONFIABILIDADE COMO
FERRAMENTA DE MELHORIA DE PERFORMANCE NUM SETOR DE INDÚSTRIA
METALÚRGICA DE GRANDE PORTE DO SUDESTE DE MINAS
GERAIS

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado a Faculdade de Engenharia da Universidade
Federal de Juiz de Fora, como requisito parcial para a obtenção do título de Engenheira
Mecânica.

Aprovada em 20 de julho de 2016.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Luiz Henrique Dias Alves.
Universidade Federal de Juiz de Fora

Eng. Hudson Valério Natividade
Votorantim Metais Zinco

Prof. Dr. Moisés Luiz Lagares Júnior
Universidade Federal de Juiz de Fora

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, Geraldo e Glória, e aos meus irmãos, Eduardo, Ana Paula, Marcelo e Patrícia, que sempre estiveram ao meu lado e nunca mediram esforços para obtenção deste título.

À Votorantim Metais pela oportunidade de desenvolvimento deste trabalho em suas dependências. Ao Engenheiro de Confiabilidade da Votorantim Metais Zinco – Juiz de Fora, Hudson Valério Natividade, pelo apoio e co-orientação. Ao Gerente da área de Ustulação, Engenheiro Marco Antônio Teixeira, pela disponibilidade, cooperação e motivação.

Aos professores da Faculdade de Engenharia, que foram imprescindíveis para minha formação. Em especial, agradeço ao professor Luiz Henrique Dias Alves pela orientação, dedicação e incentivo.

RESUMO

A manutenção mecânica industrial é um importante campo de conhecimento da engenharia mecânica, sendo essencial sua aplicação em qualquer planta industrial, uma vez que estas normalmente contam com inúmeros equipamentos mecânicos no processo de produção. Diante do cenário econômico atual altamente globalizado e competitivo, a necessidade de redução de custo de produção tornou-se primordial para a sobrevivência das empresas. Neste contexto a manutenção passou a ser vista como uma forma de sustentação da empresa trazendo conceitos de gestão de ativos, e não mais como função geradora de custos, requerida simplesmente para o reparo e conservação dos equipamentos.

Entretanto, segundo dados da ABRAMAN, Associação Brasileira de Manutenção, cerca de um terço das empresas brasileiras ainda utilizam somente a manutenção corretiva. Isto explica o alto custo da manutenção, aproximadamente 4,7% do PIB, altos valores de estoque e a baixa competitividade do país.

Conforme Nascif e Kardec (2009, p.106) “Confiabilidade é a probabilidade de um componente, equipamento ou sistema exercer sua função sem falhas, por um período de tempo previsto, sob condições de operação especificadas”. Com o avanço da tecnologia e dos processos de investigação de falha, especialmente os propostos pela indústria aeronáutica, conforme demonstrado por Scutti & MCBrine (1996), a RCM (*Reliability Centered Maintenance*) ou MCC (Manutenção Centrada na Confiabilidade) assumiu uma posição de destaque nas organizações. Isto porque, aumentar a confiabilidade pode significar melhorar a competitividade da empresa. A RCM é um processo usado para determinar: “O que precisa ser feito para assegurar que qualquer item físico continue a cumprir as funções desejadas no seu contexto operacional por um dado tempo”. Isso corrobora a afirmação de Nascif e Kardec (2009) que as falhas podem interferir na qualidade dos produtos e no desempenho da empresa.

Palavras-chave: manutenção, confiabilidade, Weibull, turbina a vapor, indústria metalúrgica.

ABSTRACT

Industrial mechanical maintenance is an important knowledge of the mechanical engineering field, its application is essential in any industrial plant, since it has numerous mechanical equipments in the production process. Given the current economic scenario highly globalized and competitive, the need to reduce cost of production has become extremely important to the survival of the companies. In this context, the maintenance was seen as a way to support the company, bringing concepts of asset management, and not as generating costs, required just for repairing and maintenance of equipments.

However, according to the ABRAMAN, Brazilian Association of Maintenance, about one third of Brazilian companies still use only corrective maintenance. This explains the high maintenance cost, approximately 4.7% of GNP, as well as high stock values and brazilian low competitiveness.

According to Nascif and Kardec (2009, p.106) "Reliability is the probability of a component, equipment or system to perform without failure for a period of time provided under specified operating conditions." With the development of technology and failure investigation processes, especially those proposed by the airline industry, as demonstrated by Scutti & McBrine (1996), the RCM (Reliability Centered Maintenance) took a prominent position in organizations, since increasing reliability can mean improving the company's competitiveness. RCM is a process used to determine: "What needs to be done to ensure that any physical item to continue performing the required functions in its operating environment for a given time." This corroborates the statement of Nascif and Kardec (2009) that failures can interfere with product quality and company's performance.

Keywords: maintenance, reliability, Weibull, steam turbine, metallurgical industry.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Aumento das expectativas de manutenção. Fonte: Adaptado de Moubray (1997).	21
Figura 2. Mudança das técnicas de manutenção. Fonte: Adaptado de Moubray (1997).	21
Figura 3. Abordagem da manutenção nas indústrias brasileiras. Fonte: Documento Nacional 2013 - ABRAMAN.	22
Figura 4. Idade média dos equipamentos/Instalações nas Empresas Brasileiras. Fonte: Documento Nacional 2013 – ABRAMAN.	24
Figura 5. Valor de estoques pelo custo total da manutenção. Documento Nacional 2013 – ABRAMAN.	25
Figura 6. Tipos de manutenção. Fonte: Adaptado de Kardec & Nascif (2009)	28
Figura 7. Principais indicadores de desempenho utilizados. Fonte: Documento Nacional 2009 - ABRAMAN.	29
Figura 8. Curva Característica da Vida de Equipamentos (Curva da Banheira). Fonte: adaptado de Sellitto (2005 apud Wuttke, 2008).	31
Figura 9. Valores de OEE e sua influência na competitividade da organização. Fonte: Adaptado de ALVES 2011.	33
Figura 10. Função densidade de probabilidade de Weibull para valores distintos de η . Fonte: Hot Wire, The eMagazine for the Reliability Professional.	34
Figura 11. Ferramentas utilizadas para promover a qualidade. Documento Nacional 2013 - ABRAMAN.	35
Figura 12. Etapas de implementação da RCM. Fonte: ZAION (2003), apud SOUZA. F. J	37
Figura 13. Escala de avaliação para o FMEA. Fonte: Pinto & Xavier (2001) apud (ROSA 2006, p.70).....	39
Figura 14. Exemplo básico da estrutura de uma árvore de falhas. Fonte: Fogliato (2011).	40
Figura 15. Etapas de implementação da MASP. Fonte: Campos (2009), apud (ROSA 2006, p.72).....	41
Figura 16. Fluxograma do processo de obtenção do zinco metálico, VMZ-JF. Fonte: elaborado pelo próprio autor.....	43

Figura 17. Sistema de Gestão da manutenção. Fonte: fornecido pela empresa.	44
Figura 18. Esquema simplificado do processo de ustulação. Fonte: adaptado de Votorantim Metais (VMZ-JF).....	45
Figura 19. Turbina de acionamento da bomba de alimentação de água da caldeira de recuperação de gases da Ustulação. Fonte: fornecido pela empresa.	48
Figura 20. Fluxograma da metodologia utilizada no estudo de caso. Fonte: desenvolvido pelo próprio autor.	49
Figura 21. <i>Reliability Block Diagram</i> (RBD). Fonte: elaborado pelo próprio autor com uso da ferramenta BlockSim do <i>software Synthesis Plataform</i>	52
Figura 22. Confiabilidade do sistema em função do tempo. Fonte: resultado de simulação pela ferramenta <i>BlockSim</i> do <i>software Synthesis Plataform</i>	53
Figura 23. Confiabilidade da turbina em função do tempo. Fonte: resultado de simulação pela ferramenta <i>BlockSim</i> do <i>software Synthesis Plataform</i>	54
Figura 24. Árvore de Falha: travamento da turbina a vapor. Fonte: fornecido pela empresa.	56
Figura 25. Componentes da turbina após desmontagem para investigação da falha. Fonte: fornecido pela empresa.	57
Figura 26. Resumo do plano de ação estabelecido pela análise de falhas. Fonte: adaptado de VMZ-JF.	57
Figura 27 Vista em corte longitudinal da turbina.	62
Figura 28. Função Confiabilidade da turbina a vapor. Fonte: resultado de simulação pela ferramenta <i>BlockSim</i> do <i>software Synthesis Plataform</i>	63
Figura 29. Função Probabilidade de falha da turbina a vapor. Fonte: resultado de simulação pela ferramenta <i>BlockSim</i> do <i>software Synthesis Plataform</i>	63
Figura 30. Função densidade de probabilidade da turbina a vapor. Fonte: resultado de simulação pela ferramenta BlockSim do software Synthesis Plataform	64
Figura 31. Função Taxa de falha da turbina a vapor. Fonte: resultado de simulação pela ferramenta BlockSim do software Synthesis Plataform	64
Figura 32. Importância de confiabilidade estática da turbina a vapor para 55 horas. Fonte: resultado de simulação pela ferramenta BlockSim do software Synthesis Plataform ..	65
Figura 33. Importância de confiabilidade em função do tempo da turbina a vapor. Fonte: resultado de simulação pela ferramenta BlockSim do software Synthesis Plataform ..	65

Figura 34. Função Confiabilidade do sistema de alimentação da caldeira. Fonte: resultado de simulação pela ferramenta BlockSim do <i>software</i> Synthesis Plataform.....	66
Figura 35. Função Probabilidade de falha do sistema de alimentação da caldeira. Fonte: resultado de simulação pela ferramenta BlockSim do software Synthesis Plataform. .	66
Figura 36. Função densidade de probabilidade do sistema de alimentação da caldeira. Fonte: resultado de simulação pela ferramenta BlockSim do software Synthesis Plataform. .	67
Figura 37. Importância de confiabilidade estática do sistema de alimentação de água da caldeira para 55horas.Fonte: resultado de simulação pela ferramenta BlockSim do software Synthesis Plataform.	67
Figura 38. Importância de confiabilidade em função do tempo do sistema de alimentação de água da caldeira.	68

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

MCC: Manutenção Centrada na Confiabilidade (*Reliability Centered Maintenance* - RCM)

TPM: Manutenção Produtiva Total (*Total Productive Maintenance*)

RBM: Manutenção Baseada no Risco (*Risk Based Maintenance*)

ABRAMAN: Associação Brasileira de Manutenção e Gestão de Ativos

NBR: Norma Brasileira Regulamentadora

MTTF: Tempo Médio até a Falha (*Mean Time To Failure*)

β : Beta. Parâmetro de Forma

η : Eta. Parâmetro de Escala

λ : Lambda. Taxa de Falha

OEE: Eficiência Operacional Máxima (*Overall Equipment Effectiveness*)

FMEA: Análise do Modo e Efeito de Falha (*Failure Mode and Effect Analysis*)

FTA: Árvore de Análise de Falhas (*Failure Tree Analysis*)

MASP: Metodologia e Análise de Solução de Problemas

PDCA: Planejar, Realizar, Verificar e Corrigir (*Plan, Do, Check and Action*)

ERP: Planejamento de Recurso Corporativo (*Enterprise Resource Planning*)

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	14
1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS	14
1.2 JUSTIFICATIVA.....	14
1.3 ESCOPO DO TRABALHO	15
1.4 ELABORAÇÃO DOS OBJETIVOS.....	15
1.5 DEFINIÇÃO DA METODOLOGIA	16
1.6 ESTRUTURA DO TRABALHO	16
2. REFERENCIAL TEÓRICO	18
2.1 HISTÓRICO	18
2.1.1 INTRODUÇÃO	18
2.1.2 A EVOLUÇÃO	19
2.2 TIPOS DE MANUTENÇÃO	22
2.2.1 MANUTENÇÃO CORRETIVA.....	24
2.2.2 MANUTENÇÃO PREVENTIVA	26
2.2.3 MANUTENÇÃO PREDITIVA	26
2.2.4 MANUTENÇÃO DETECTIVA	27
2.2.5 ENGENHARIA DE MANUTENÇÃO.....	28
2.3 INDICADORES DE MANUTENÇÃO	29
2.3.1 CONFIABILIDADE.....	30
2.3.2 DISPONIBILIDADE OPERACIONAL	30
2.3.3 TAXA DE FALHAS.....	31
2.3.4 TEMPO MÉDIO ENTRE FALHAS (TMEF).....	32
2.3.5 TEMPO MÉDIO PARA REPARO (TMPR)	32
2.3.6 EFICIÊNCIA OPERACIONAL MÁXIMA OU <i>OVERALL EQUIPMENT EFFECTIVENESS (OEE)</i>	32
2.3.7 BACKLOG.....	33
2.4 DISTRIBUIÇÃO DE WEIBULL.....	33
2.5 MANUTENÇÃO CENTRADA NA CONFIABILIDADE	35
2.5.1 INTRODUÇÃO	35
2.5.2 IMPLEMENTAÇÃO	36
2.5.3 ANÁLISE DE FALHAS	37

3. ESTUDO DE CASO	42
3.1 O GRUPO VOTORANTIM	42
3.1.1 VOTORANTIM METAIS ZINCO.....	42
3.1.2 VOTORANTIM METAIS ZINCO – JUIZ DE FORA (VMZ-JF).....	42
3.1.3 O CONTEXTO DA MANUTENÇÃO NA VMZ-JF	43
3.1.4 PROCESSO DE USTULAÇÃO	45
3.2 TURBINA A VAPOR	46
3.3 EQUIPAMENTO DE ESTUDO.....	47
3.4 DESCRIÇÃO DOS PROCEDIMENTOS DE ANÁLISE	48
3.4.1 LEVANTAMENTO DE DADOS	49
3.4.2 ANÁLISE DE DADOS E FORMULAÇÃO DO PROBLEMA	50
3.4.3 ANÁLISE DE FALHA	50
3.4.4 ELABORAÇÃO DE PLANO DE AÇÃO	51
4. RESULTADOS	52
4.1 RESULTADOS ALCANÇADOS.....	52
4.2 DISCUÇÃO DOS RESULTADOS.....	57
5. CONCLUSÕES	59
REFERÊNCIAS	60
ANEXO A – VISTA EM CORTE LONGITUDINAL DA TURBINA	62
ANEXO B – DADOS DE CONFIABILIDADE DA TURBINA	63
ANEXO C – DADOS DE CONFIABILIDADE DA CALDEIRA	66
ANEXO D – TERMO DE AUTENTICIDADE	69
ANEXO E – DECLARAÇÃO DA EMPRESA	70

1. INTRODUÇÃO

Uma vez que a disponibilidade dos ativos físicos afeta diretamente a produção, e consequentemente a receita, a manutenção de prevenção à falha tem se destacado como ferramenta para diminuir os custos. Aproveitando oportunidades neste contexto, o presente trabalho aborda o estudo de confiabilidade de um equipamento crítico em setor de indústria metalúrgica.

1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

A manutenção se faz presente desde os primórdios, com o surgimento de ferramentas manuais e acompanha o desenvolvimento técnico-industrial da humanidade. Entretanto somente após a Revolução Industrial no século XVIII, com a mecanização das indústrias e maior demanda por produtos, a manutenção passou a ser uma função de destaque.

A evolução do setor produtivo vem trazendo novas necessidades o que exige reformulação da postura das empresas no que tange a forma de atuação da manutenção para uma função mais estratégica. A integração da área de manutenção com os setores administrativos como suprimentos, financeiro, qualidade, dentre outros para alinhamento das metas permite melhor planejamento e competitividade da empresa no mercado.

A Manutenção Centrada na Confiabilidade – MCC originária da indústria aeronáutica americana na década de 60, é um processo usado para determinar: “O que precisa ser feito para assegurar que qualquer item físico continue a cumprir as funções desejadas no seu contexto operacional por um dado tempo”. Registros da ABRAMAN (2013) confirmam o crescimento da aplicação das técnicas da MCC nas empresas brasileiras desde 1997 como ferramenta para promover a qualidade. Isto porque, aumentar a confiabilidade pode significar melhorar a competitividade da empresa.

1.2 JUSTIFICATIVA

A manutenção mecânica industrial é um importante campo de conhecimento da engenharia mecânica, sendo essencial sua aplicação em qualquer planta industrial, uma vez que estas normalmente contam com inúmeros equipamentos mecânicos no processo de produção. Diante do cenário econômico atual altamente globalizado e competitivo, a necessidade de redução de custo de produção tornou-se primordial para a sobrevivência das

empresas. Desta forma, manutenção passou a ser vista como uma maneira de sustentação da empresa trazendo conceitos de gestão de ativos, e não mais como função geradora de custos, requerida simplesmente para o reparo e conservação dos equipamentos.

Entretanto, segundo dados da ABRAMAN, Associação Brasileira de Manutenção, cerca de um terço das empresas brasileiras ainda utilizam somente a manutenção corretiva. Isto explica o alto custo da manutenção, aproximadamente 4,7% do PIB, altos valores de estoque e a baixa competitividade do país.

A implementação da Manutenção Centrada na Confiabilidade nas organizações industriais busca o aumento da disponibilidade dos ativos físicos, da confiabilidade e diminuição de paradas inesperadas e manutenções corretivas. Como consequência observa-se maior conservação e vida útil dos equipamentos, com redução do risco de introdução de defeitos por atividades de manutenção e redução de custo, levando a melhores resultados financeiros (KARDEC & NASCIF, 2009).

1.3 ESCOPO DO TRABALHO

O presente trabalho aborda um tema de grande relevância, visto que a manutenção é requerida em toda organização industrial, independentemente de seu porte. A função da manutenção na indústria tem se reestruturado ao longo dos anos prevalecendo um caráter estratégico de apoio a produtividade para melhor desempenho e competitividade.

Desta forma, torna-se indispensável à formação do engenheiro mecânico conhecimento do tema diante de sua importância e grande possibilidade de atuação na área de manutenção quando em uma planta industrial.

Propõe-se aplicar as técnicas da Manutenção Centrada na Confiabilidade em um equipamento de alta criticidade no setor de uma indústria de grande porte do ramo metalúrgico, que vem apresentando intervenções corretivas, como uma ferramenta de melhoria para garantia das funções requeridas pelo equipamento.

1.4 ELABORAÇÃO DOS OBJETIVOS

Esse trabalho tem por objetivo aplicar técnicas de Manutenção Centrada na Confiabilidade em uma turbina a vapor, classe A, situada no setor de Ustulação de uma empresa de grande porte como parte integrante do circuito de alimentação de água de uma caldeira de recuperação térmica. Pretende-se com análise de dados de falha do equipamento

encontrar um tempo ideal para manutenção preventiva do equipamento dado as restrições estabelecidas pelo sistema.

1.5 DEFINIÇÃO DA METODOLOGIA

Para a realização deste trabalho foi realizada uma revisão bibliográfica a respeito da manutenção industrial com o intuito de explorar os conceitos utilizados, metodologias e ferramentas, o estado da arte, evolução da manutenção ao longo dos anos e a importância de sua implementação nas organizações.

Do ponto de vista científico, essa pesquisa pode ser considerada de natureza aplicada com objetivos exploratórios, uma vez que pretende-se aplicar seus resultados. Quanto a abordagem, trata-se de uma pesquisa quantitativa. Em relação ao método, será uma simulação (MIGUEL, 2010).

Por meio de um estudo de caso aplicou-se as técnicas da Manutenção Centrada na Confiabilidade, do inglês *Reliability Centered Maintenance* (RCM), em um equipamento de segurança de alta criticidade num setor de indústria metalúrgica que apresentou intervenção corretiva recentemente. Foi realizada análise da frequência e natureza das ações corretivas nos últimos cinco anos; simulação dos dados de falha utilizando *software* da empresa ReliaSoft, *Synthesis Platform* versão 10; investigação da ocorrência de falhas; definição de ações preventivas e corretivas e definição de tempo ideal para manutenção preventiva do equipamento.

1.6 ESTRUTURA DO TRABALHO

Este trabalho é composto por cinco capítulos, Introdução, Referencial Teórico, Estudo de caso, Resultados e Conclusão.

No capítulo Introdução são apresentados os objetivos do trabalho, a metodologia aplicada e as razões que justificam a elaboração do mesmo.

No capítulo Referencial Teórico é exposto referencial teórico detalhado que sintetiza informações relevantes sobre a manutenção industrial, suas classes, evolução ao longo do tempo e valida a utilização da metodologia da Manutenção Centrada na Confiabilidade aqui aplicada.

No capítulo Estudo de Caso discorre-se a respeito do Grupo Votorantim, e da Votorantim Metais Zinco-Juiz de Fora onde se realizou a pesquisa. É apresentada uma breve

descrição sobre o processo de obtenção do zinco metálico e a visão da manutenção na unidade fabril de Juiz de Fora. São ainda expostos os procedimentos utilizados para análise de dados do equipamento, simulação e análise de falha.

O capítulo Resultados apresenta os resultados obtidos pela simulação dos dados, Árvore de Falha e discussão dos mesmos. No capítulo Conclusão encerra-se o trabalho com análise crítica dos resultados, avaliação de consistência, proximidade com a teoria e verificação do alcance do objetivo proposto.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

Este capítulo apresenta os conceitos e definições no âmbito do conhecimento da manutenção que serão de recorrente uso no desenvolvimento do referido trabalho. Traz também uma síntese da visão sobre a função manutenção nas organizações ao longo dos anos, desde seu surgimento no contexto industrial e expõe a situação atual da manutenção nas empresas brasileiras. Por fim é feita uma descrição da Manutenção Centrada na Confiabilidade, do inglês *Reliability Centered Maintenance* (RCM) que é a ferramenta de estudo do trabalho proposto.

2.1 HISTÓRICO

2.1.1 Introdução

O termo manutenção, derivado do latim *manus tenere*, é definido pela NBR 5462 como um *conjunto de ações técnicas e administrativas, incluindo as de supervisão, destinadas a manter ou recolocar um item em um estado no qual possa desempenhar uma função requerida*. Monchy (1994) complementa que manter é escolher os meios de prevenir, de corrigir ou renovar segundo a utilização do material e do que é economicamente crítico, afim de otimizar o custo global de propriedade. A manutenção pode ser considerada como uma combinação de ações conduzidas para substituir, revisar ou modificar componentes ou grupos identificáveis de componentes de um equipamento. Tudo isto, para que este opere dentro de uma disponibilidade especificada em um intervalo de tempo também especificado (ROSA, pag. 8, lin. 1-4).

As várias práticas de manutenção têm por finalidade garantir que um ativo desempenhe com segurança a função para a qual foi projetado. Segundo Rodrigues (2000) os bens de produção são projetados para não falhar e a alta resistência a ocorrência de falhas implica em robustez. Como equipamentos robustos são mais caros, muitas vezes equipamentos menos robustos são adquiridos, sendo necessário implementação de ações efetivas que visem a conservação e estabilidade dos mesmos. A conservação dos equipamentos, evita o desgaste excessivo, a falha, paradas de produção, redução da disponibilidade e possível decaimento na qualidade dos produtos.

É largamente adotada em ambientes fabris, uma vez que estes compõem-se de inúmeros equipamentos mecânicos. Estes equipamentos são de suma importância para o

funcionamento da organização industrial, onde a disponibilidade, ou seja, a capacidade de ser operacional, dita o ritmo da produção. Pereira (2010) ressalta a importância da integração da área de manutenção com os setores administrativos como suprimentos, financeiro, qualidade, dentre outros para alinhamento das metas buscando melhor planejamento e garantia de bons resultados. Estando diretamente ligada à produtividade e qualidade, a manutenção busca um maior rendimento produtivo global da planta aliado ao aumento da disponibilidade dos ativos e da diminuição de custos. Isto permite o cumprimento das metas de produção e maior competitividade da empresa no mercado.

2.1.2 A Evolução

A atividade de manutenção tem sofrido muitas mudanças nas últimas décadas. Kardec & Nascif (2009) afirma que tais alterações são consequências do rápido aumento do número, da complexidade e da diversidade dos itens físicos (instalações, equipamentos e edificações); de novas técnicas de manutenção; e dos novos enfoques e responsabilidades da manutenção como função estratégica para melhoria dos resultados e aumento da competitividade das organizações. Tais expectativas de mudança vêm trazendo nova postura das empresas no que tange a forma de atuação e função da manutenção. Como a consciência do quanto a ocorrência de falhas interfere na produtividade, na segurança e no meio ambiente; no relacionamento da manutenção com a qualidade do produto; da busca pela alta confiabilidade e disponibilidade dos equipamentos e da necessidade da diminuição de custos e aumento da competitividade.

A manutenção se faz presente desde os primórdios, com o surgimento de ferramentas manuais e acompanha o desenvolvimento técnico-industrial da humanidade. Entretanto somente após a Revolução Industrial no século XVIII, com a mecanização das indústrias e maior demanda por produtos, a manutenção passou a ser uma função de destaque como forma de garantir a produtividade. O termo surge efetivamente como função do organismo produtivo no século XVI com o aparecimento dos primeiros teares mecânicos, época que marca o abandono da produção artesanal e do sistema econômico feudal e início de um processo de acumulação originária de capitais Viana (2002).

Este período é marcado pela baixa mecanização, pela simplicidade e robustez dos equipamentos, geralmente superdimensionados. A produtividade não era uma questão prioritária e entendia-se que os equipamentos se desgastavam com o tempo, sendo normal a ocorrência de falhas. Logo, a manutenção era realizada pós quebra e se restringia à

substituição de peças, atividades de limpeza e lubrificação, caracterizando a manutenção corretiva não planejada. Este cenário em que a manutenção como função de reparo era realizada pelo próprio operador, se manteve até o surgimento da Primeira Guerra Mundial quando então, se estabelecem as primeiras técnicas de planejamento de serviços como a produção em massa instituída por Frederick Taylor (1856 – 1915) e o gráfico de Gantt.

O período pós Segunda Guerra foi marcado pelo aumento da mecanização, da complexidade das fábricas e da demanda por produtos ao passo em que tornou-se notório a deficiência de mão-de-obra. A dependência do perfeito funcionamento do maquinário fez notar a importância no aumento em realizar reparos de forma mais ágil e, principalmente, evitar a ocorrência de falhas. Conceitos como confiabilidade e disponibilidade e aumento da vida útil dos equipamentos tornaram-se indispensáveis na busca pelo aumento da produtividade, surgindo o conceito de manutenção preventiva. A manutenção então, se firmou como necessidade absoluta resultando no aumento dos sistemas de planejamento e controle da produção e da forma de gerenciamento.

Com o avanço da indústria aeronáutica entre 1940 e 1996, ocorre a expansão do conceito e utilização da manutenção preventiva com o surgimento de equipes altamente especializadas destinadas, não somente a definir, como aumentar a disponibilidade dos equipamentos. O gerenciamento de materiais e sobressalentes, a análise de falhas e o aumento da segurança é então englobado no que se chama de Engenharia de Manutenção. Como resultado de estudo realizado pela *Federal Aviation Administration* para manutenção programada de aviões *Boeing 747* utilizando conceitos de confiabilidade, surge na década de 60 a MCC – Manutenção Centrada na Confiabilidade. A TPM – *Total Productive Maintenance* ou Manutenção Produtiva Total surge no Japão na década de 70 através da empresa *Nippon Denso KK*, integrante do grupo *Toyota*.

Moubray (1997) sintetiza a evolução das práticas de manutenção em três gerações conforme mostram as figuras abaixo.

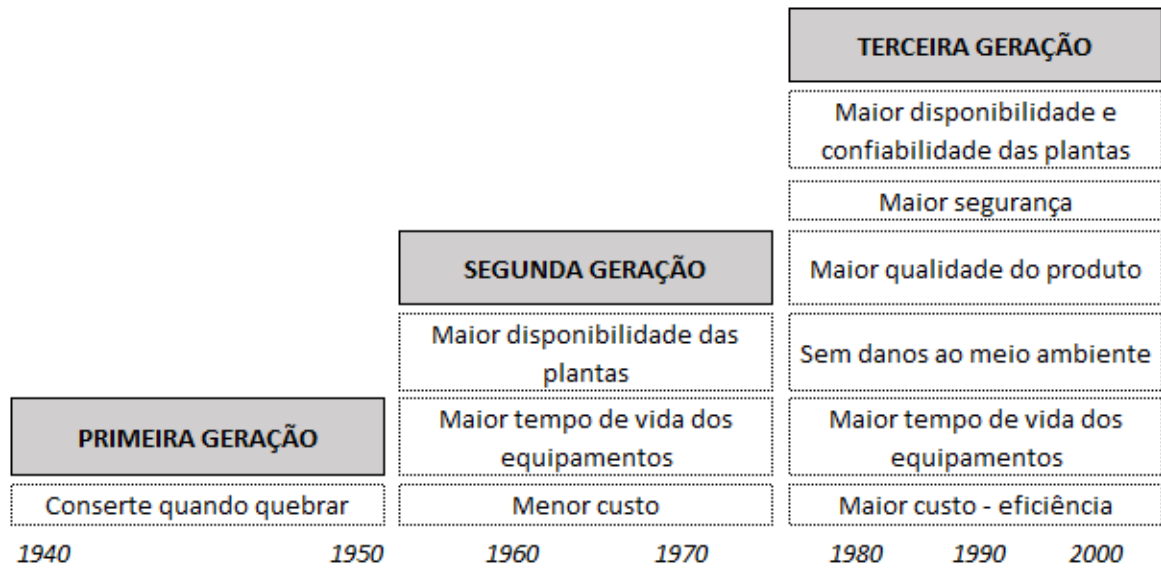


Figura 1. Aumento das expectativas de manutenção. Fonte: Adaptado de Moubray (1997).

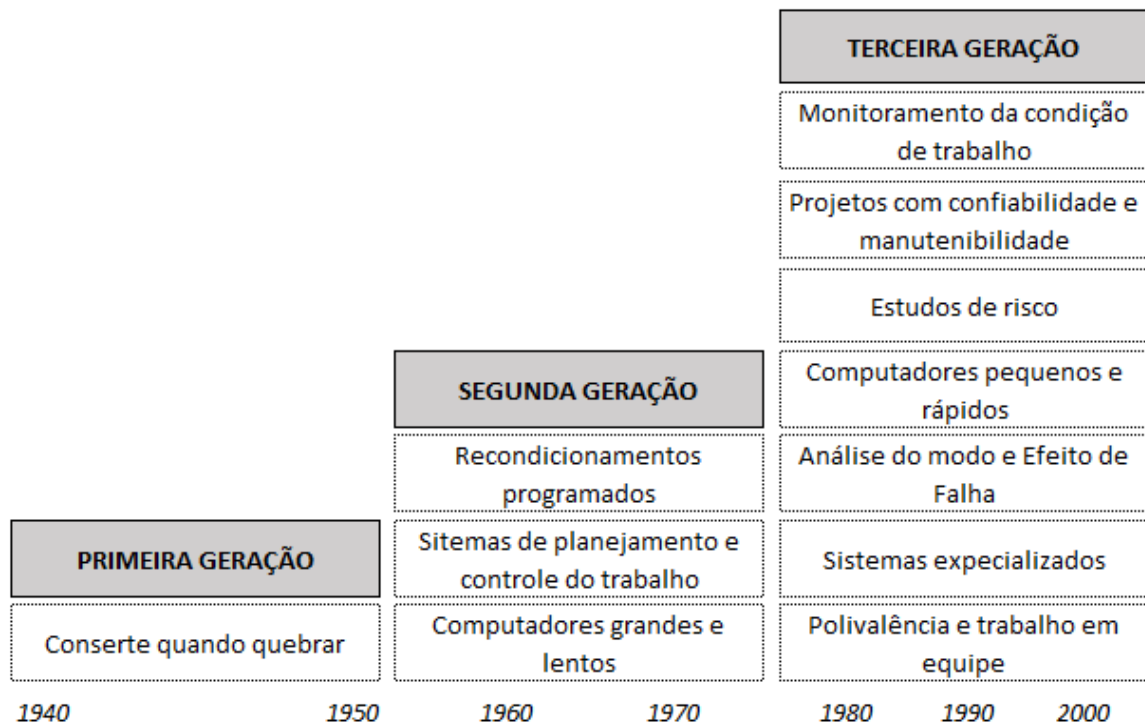


Figura 2. Mudança das técnicas de manutenção. Fonte: Adaptado de Moubray (1997).

2.2 TIPOS DE MANUTENÇÃO

As várias abordagens adotadas para a prática da manutenção possibilitam a divisão deste tema em tipos classificados conforme o método de intervenção no sistema produtivo, agindo antecipadamente a falha ou posteriormente a sua ocorrência. Desta forma podemos distinguir os seguintes tipos de manutenção considerada por muitos autores: corretiva, preventiva, preditiva, detectiva e engenharia de manutenção.

As ferramentas de manutenção são utilizadas de forma a permitir a implementação de um dos tipos de manutenção. Muitas vezes tais ferramentas possuem o termo manutenção em seu nome o que pode causar uma confusão por pensar o leitor em ser este, um novo tipo de manutenção diferente dos acima citados, como por exemplo:

- Manutenção Produtiva Total (TPM) ou *Total Productive Maintenance*;
- Manutenção Centrada na Confiabilidade (RCM) ou *Reliability Centered Maintenance*;
- Manutenção Baseada em Risco (RBM) ou *Risk Based Maintenance*.

A Figura 3 extraída do último relatório anual da ABRAMAN apresenta a distribuição das abordagens de manutenção aplicadas nas indústrias brasileiras.

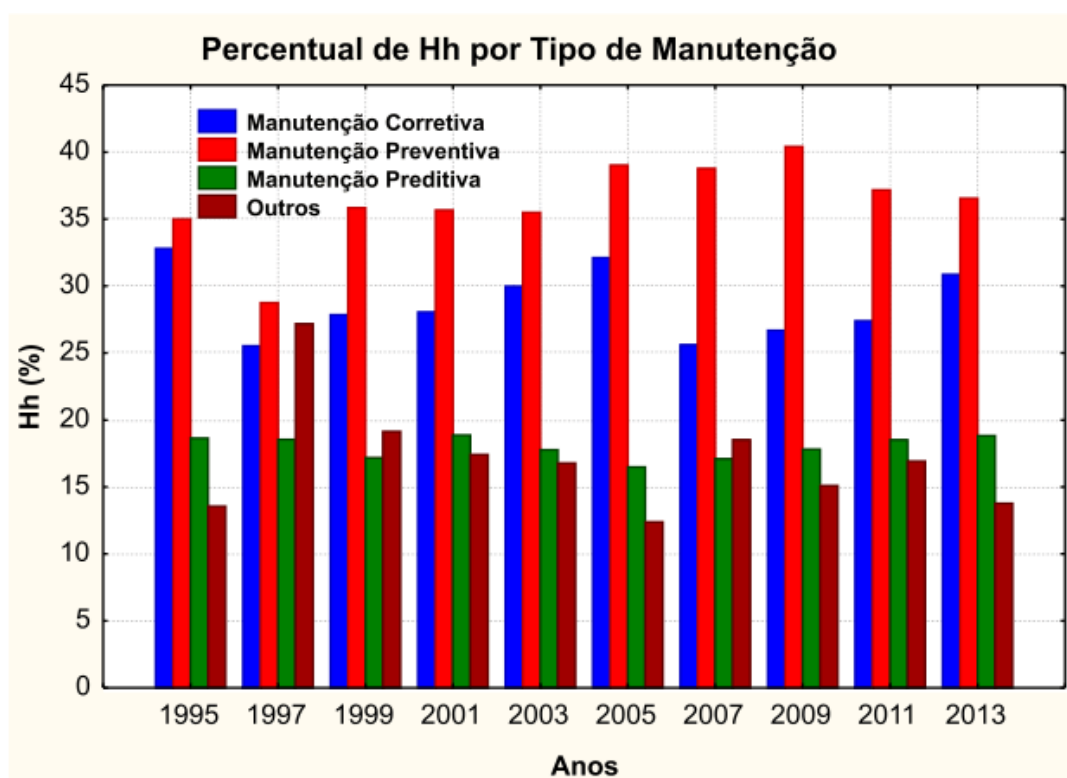


Figura 3. Abordagem da manutenção nas indústrias brasileiras. Fonte: Documento Nacional 2013 - ABRAMAN.

Observa-se que as empresas brasileiras mantêm alto índice de manutenção corretiva, cerca de 30%. Já a manutenção preditiva representa apenas aproximados 18%. A situação da manutenção no Brasil, altamente corretiva, explica o alto custo de manutenção das empresas e a baixa competitividade do país. Segundo dados estatísticos da ABRAMAN, em 2013 o gasto das empresas brasileiras com manutenção representou cerca de 4,69% do PIB. Valor alto e impactante no resultado das organizações.

A literatura nos mostra que o custo de um equipamento é dado por 20 a 25% referente a aquisição (projeto, fabricação, transporte e instalação) e 75 a 80% à sustentação do equipamento, gastos com atividades de manutenção. Em um cenário altamente globalizado, industrializado e competitivo, o custo com manutenção é um fator de grande relevância que deve ser minimizado. Atualmente o tempo de vida útil dos equipamentos nas empresas brasileiras é de 17 anos.

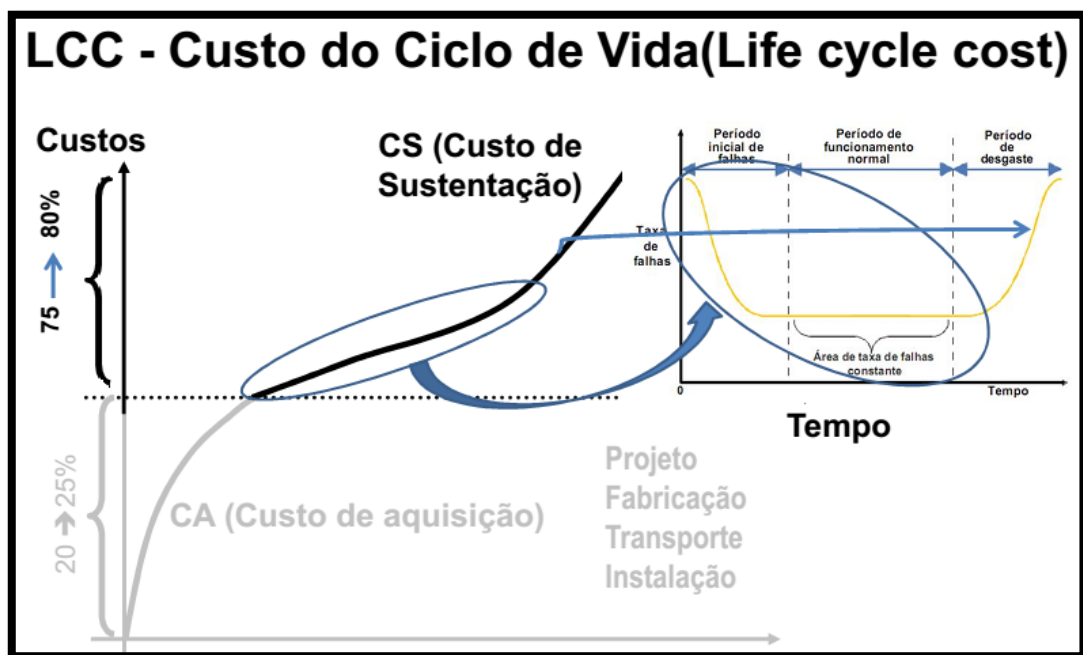


Figura 4. Custo do Ciclo de Vida de um equipamento. Fonte: Notas de aula L. H. D. Alves.

Idade Média dos Equipamentos/Instalações nas Empresas Brasileiras	
Ano	Idade Média
2013	16,90 (~17 anos)
2011	15,94 (~16 anos)
2009	16,73 (~17 anos)
2007	17,27 (~17 anos)
2005	16,95 (~17 anos)
2003	16,38 (~16 anos)
2001	17,97 (~18 anos)
1999	15,96 (~16 anos)
1997	15,51 (~16 anos)
1995	16,20 (~16 anos)

Figura 4. Idade média dos equipamentos/Instalações nas Empresas Brasileiras. Fonte: Documento Nacional 2013 – ABRAMAN.

A manutenção deve ser vista pelas empresas não como uma atividade de reparo e sim como uma função estratégica para aumentar a produtividade, a disponibilidade dos equipamentos e a maximização dos lucros. Ainda segundo dados da ABRAMAN, a indisponibilidade operacional devido a manutenção nos últimos 10 anos corresponde a 5,6%. Ou seja, as empresas ficam 5,6% de seu tempo paradas para realizar atividades de manutenção. O que sustenta a necessidade de otimização da política de manutenção nas empresas, com fortalecimento da visão estratégica, do aumento da disponibilidade e balanceamento adequado das várias abordagens de manutenção na busca de maior competitividade.

Indicadores de Disponibilidade (%)									
Tipo	1997	1999	2001	2003	2005	2007	2009	2011	2013
Disponibilidade Operacional	85,82	89,30	91,36	89,48	88,20	90,82	90,27	91,30	89,29
Indisponibilidade devido a Manutenção	4,74	5,63	5,15	5,82	5,80	5,30	5,43	5,44	6,15

Figura 6. Disponibilidade operacional. Fonte: Documento Nacional 2013 – ABRAMAN.

2.2.1 Manutenção Corretiva

A manutenção corretiva é a forma mais simples, e muitas vezes a mais usada, de se aplicar as técnicas de manutenção. Conforme verificado na figura 3, aproximadamente um terço das empresas brasileiras adotam esta prática. Segundo Pereira (2011), a Corretiva

caracteriza-se pela condição “o ativo opera até quebrar”, não havendo antecipação da falha. Este método implica na parada da linha e perda de produção além de altos níveis de desgastes ao equipamento. Outro fator que o torna dispendioso é a necessidade de níveis de estoque capazes de suprir a troca imediata da máquina ou componente avariado. Atualmente o valor de estoque representa cerca 13% do custo total da manutenção, conforme levantamento realizado pela ABRAMAN em 2013.

Estoque						
Índices de Custos	1997	1999	2001	2003	2005	2007
Valor de Estoque pelo Custo Total da Manutenção	16,00%	13,00%	11,95%	11,48%	14,02%	13,11%
Rotatividade de Estoque	5 meses	4 meses	4 meses	4 meses	4 meses	5 meses

Estoque						
Índices de Custos	2009	2011	2013	2015	2017	2019
Valor de Estoque pelo Custo Total da Manutenção	13,11%	13,20%	13,41%			
Rotatividade de Estoque	5 meses	4 meses	5 meses			

Figura 5. Valor de estoques pelo custo total da manutenção. Documento Nacional 2013 – ABRAMAN.

A manutenção corretiva pode ainda ser subdividida em:

- Corretiva não planejada: a correção da falha ou do desempenho abaixo do esperado é realizada sempre após a ocorrência do fato, sem acompanhamento ou planejamento anterior, aleatoriamente. Implica em altos custos e baixa confiabilidade de produção, já que gera ociosidade e danos maiores aos equipamentos, muitas vezes irreversíveis (OTANI & MACHADO, 2008).

Porém em alguns casos essa abordagem é a preferida. Mas, deve-se salientar que quando uma empresa tem a maior parte de sua manutenção corretiva na classe não planejada, sua equipe de manutenção é comandada pelos equipamentos e o desempenho da organização não será adequado às necessidades de competitividade atuais, baixo custo e alto desempenho (ALVES, 2011).

- Corretiva planejada: “É a correção do desempenho menor do que o esperado ou da falha, por decisão gerencial, isto é, pela atuação em função de acompanhamento preditivo ou pela decisão de operar até a quebra”. (SANTOS, 2012). Ou seja, quando por decisão gerencial, o equipamento for submetido intencionalmente à operação até a ocorrência da falha sem que haja intervenções para manutenção, tem-se uma manutenção corretiva planejada.

2.2.2 Manutenção Preventiva

A manutenção preventiva é adotada antecipadamente à falha de modo se obter controle sobre o equipamento, diminuindo a probabilidade de ocorrência do mesmo. A figura 3 extraída do último relatório da Associação Brasileira de Manutenção e Gestão de Ativos (ABRAMAN) revela uma tendência de crescimento desta prática no Brasil, sendo superior aos métodos de Manutenção Corretiva e Preditiva. Esta prática é adotada quando fatores de segurança sobrepõe ao fator de custo.

São adotadas, para planejamento dos reparos necessários, atividades de manutenção em intervalos pré-determinados, definidos por experiência própria ou métodos estatísticos que retratem a condição de operação do equipamento como a curva de tempo médio para falha. “(...) O problema desse tipo de manutenção está na escolha de um intervalo apropriado para a parada do equipamento.” (SANTOS, 2012). Uma análise errônea dos parâmetros e a não consideração de fatores fabris que influenciam na vida útil da máquina podem ocasionar na troca de equipamentos de forma antecipada a sua capacidade de operação ou até mesmo na ocorrência de falhas inesperadas por quebra do equipamento.

Segundo Marçal (2004) a manutenção preventiva se subdivide em:

- Manutenção preventiva programada ou sistemática: é quando os serviços de manutenção são efetuados de maneira periódica, através de intervalos pré-estabelecidos, dias de calendários, ciclos de operações, horas de operações e outros desprezando as condições dos componentes envolvidos.
- Manutenção preventiva de rotina: são as manutenções preventivas feitas com intervalos pré-determinados e de tempos reduzidos, com prioridades claramente definidas e curtas duração de execução, na maioria das vezes apoiadas apenas nos sentidos humanos, sem causar a indisponibilidade da instalação ou equipamento. Geralmente são conhecidas como inspeções e verificações sistemáticas apoiadas pelo uso de *checklist* ou demais controles.

2.2.3 Manutenção Preditiva

É a manutenção que realiza acompanhamento de variáveis e parâmetros de desempenho de máquinas e equipamentos, visando definir o instante correto da intervenção, com o máximo de aproveitamento do ativo. (OTANI & MACHADO, 2008). O monitoramento das variáveis e parâmetros e interpretação adequada dos mesmos permite a

visualização das reais condições de operação do equipamento e seus componentes maximizando o tempo de operação e evitando o reparo antecipado, tornando a operação mais segura e econômica, minimizando as perdas de produção pela disponibilidade operacional e redução de custos de manutenção.

“Técnicas preditivas:

Ensaio elétrico (corrente, tensão e isolamento).

Análise de vibrações (nível global, espectro de vibrações e pulsos de choque).

Análise de óleos (viscosidade, teor de água e contagem de partículas).

Análise de temperatura (termometria convencional e indicadores de temperatura).

Energia acústica (ultrassom e emissão acústica).”

(SANTOS 2012)

Segundo Almeida (2000) “(...) Talvez a diferença mais importante entre manutenção reativa e preditiva seja a capacidade de se programar o reparo quando ele terá o menor impacto sobre a produção. O tempo de produção perdido como resultado de manutenção reativa é substancial e raramente pode ser recuperado. A maioria das plantas industriais, durante períodos de produção de pico, operam 24 horas por dia. Portanto, o tempo perdido de produção não pode ser recuperado. ”

2.2.4 Manutenção Detectiva

A manutenção detectiva começou a ser mencionada na literatura a partir da década de 90. Kardec & Nascif (2009) a define como a atuação efetuada em sistemas de proteção, comando e controle, buscando detectar falhas ocultas ou não perceptíveis ao pessoal de operação e manutenção. Portanto, consiste na inspeção das funções ocultas, em intervalos regulares, para ver se ocorreu alguma falha e recondição-las em caso positivo (falha funcional). Esse sistema de detecção apresenta uma tendência crescente em virtude da maior automação das plantas e da utilização de computadores digitais em instrumentação (sistemas digitais de controle distribuídos – SDCD). É primordial para garantir a confiabilidade e deve ser interpretado por pessoal treinado. Comparado com a manutenção preditiva, em que é necessário o diagnóstico a partir de parâmetros, na manutenção detectiva, o diagnóstico é definido após o processamento das informações colhidas na planta.

2.2.5 Engenharia de Manutenção

A Engenharia de Manutenção é uma forma de gestão da manutenção no sentido em que busca a consolidação de rotina e adota uma política de melhoria contínua das atividades de manutenção. Para Kardec & Nascif (2009) a Engenharia de Manutenção significa perseguir benchmarks. Ou seja, aprender com empresas líderes de mercado novas técnicas aplicáveis as atividades de manutenção na busca pela excelência. É de responsabilidade da engenharia de manutenção aumentar a confiabilidade, a disponibilidade e a segurança dos equipamentos; buscar novos projetos; elaborar planos de manutenção e inspeção; fazer Análise de Falhas e ainda garantir a capacitação da equipe.

Além disso a Engenharia de Manutenção tem por função organizar e manter atualizado o banco de dados da empresa, assim poderá utilizar informações passadas para estudos posteriores, para comparação da evolução das atividades e para o gerenciamento pelos indicadores de manutenção. Abaixo figura que sintetiza a função dos tipos de manutenção descritos no referido trabalho.

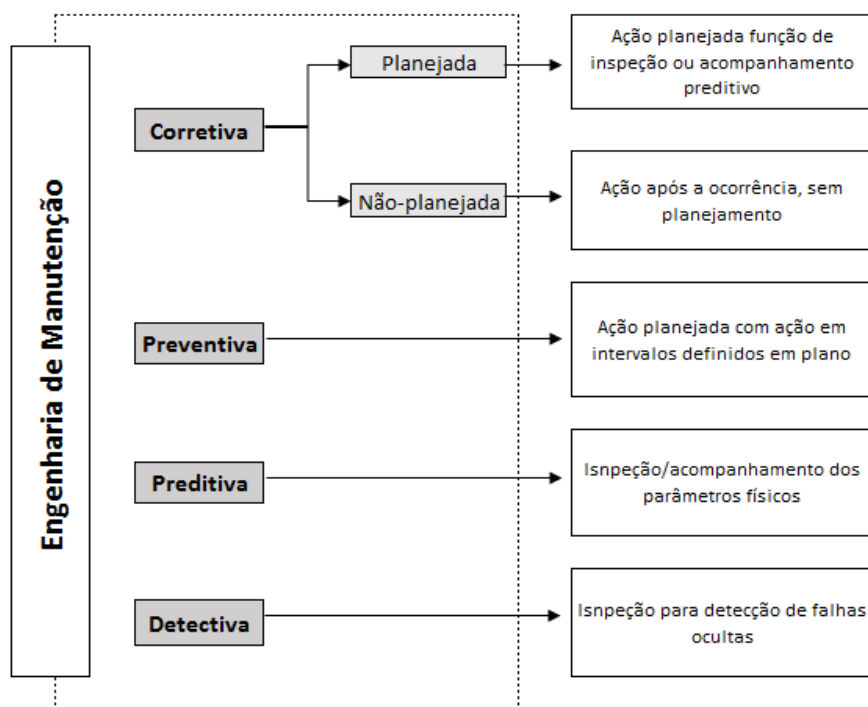


Figura 6. Tipos de manutenção. Fonte: Adaptado de Kardec & Nascif (2009)

2.3 INDICADORES DE MANUTENÇÃO

O desempenho e a competitividade das indústrias dependem da confiabilidade, disponibilidade e produtividade de suas instalações de produção. Indicadores de desempenho são utilizados para garantir que os resultados estejam em conformidade com os requisitos de desempenho da produção, ou seja, os indicadores são elementos-chave, importantes na gestão da função da manutenção. A literatura disponível na área de manutenção nos aponta muitos indicadores. É importante para o gerenciamento da manutenção escolher indicadores consistentes com os objetivos da organização trazendo informações que possam agregar valor a mesma.

A ABRAMAN, Associação Brasileira de Manutenção, relata em documento “A situação da Manutenção no Brasil”, 2009, os principais indicadores utilizados pelas empresas brasileiras. Apontando para a importância de indicadores de disponibilidade operacional, custos e tempo de falhas. É importante lembrar que equipamentos submetidos a diferentes condições de uso apresentarão diferentes confiabilidades, sendo importante sua consideração na comparação de indicadores de equipamentos instalados em diferentes locais e plantas.

Principais Indicadores de Desempenho Utilizados (Grau de Importância - GI)									GI 2009
Tipos	1995	1997	1999	2001	2003	2005	2007	2009	
Custos	26,21	26,49	26,32	25,91	21,45	21,96	20,33	18,98	2
Frequência de Falhas	17,54	12,20	14,24	16,22	11,66	12,17	9,75	9,81	6
Satisfação do Cliente	13,91	11,01	11,76	11,86	8,62	8,11	8,93	9,38	7
Disponibilidade Operacional	25,20	24,70	22,60	23,24	19,58	19,81	18,51	20,68	1
Retrabalho	9,07	5,65	8,36	8,96	6,06	6,68	3,97	5,33	8
Backlog	8,07	6,55	8,98	10,41	9,32	6,92	11,57	10,02	5
Não Utilizam	-	2,09	2,79	1,22	1,63	0,72	0,33	1,07	9
TMPF (MTTF)	-	-	-	-	11,89	11,69	14,21	12,79	3
TMPR (MTTR)	-	-	-	-	9,56	11,46	11,74	11,94	4
Outros Indicadores	-	11,31	4,95	2,18	0,23	0,48	0,66	0,00	10

Figura 7. Principais indicadores de desempenho utilizados. Fonte: Documento Nacional 2009 - ABRAMAN.

Em sequência estão listados alguns indicadores básicos trazidos na literatura por vários autores.

2.3.1 Confiabilidade

A confiabilidade de um equipamento é a probabilidade do mesmo desempenhar sua função sob condições definidas de uso durante um determinado tempo. Por ser uma probabilidade é medida entre 0 e 1 (ou 0 e 100%), sendo calculada da seguinte forma:

$$R(t) = 1 - F(t) \text{ e}$$

$$F(t) = \int_0^t f(t)dt$$

Onde:

R(t): confiabilidade do equipamento num tempo t

F(t): função probabilidade de falha

f(t): função densidade de probabilidade

Em um conjunto de n equipamentos a confiabilidade é calculada de acordo com a configuração do sistema, a saber:

Sistema em série: $R_{série} = \prod_{i=1}^n R(n)$

Sistema em paralelo: $R_{paralelo} = \left[1 - \prod_{i=1}^n (1 - R(n)) \right]$

2.3.2 Disponibilidade Operacional

Para Kardec(2009) a disponibilidade é a capacidade de um item estar em condições de executar a função requerida em um dado instante ou durante um intervalo de tempo determinado. A disponibilidade operacional pode ser calculada da seguinte forma:

$$\text{Disponibilidade operacional (\%)} = \frac{TMEM}{TMEM+TMP} * 100$$

Onde:

TMEM: tempo médio entre manutenções, do inglês MTBM – *Mean Time Between Maintenance*.

TMP: tempo médio de paralisações, do inglês MDT – *Mean Time Down*. Inclui o tempo gasto para reparo e o tempo de espera, atraso, deslocamento e outros que contribuam para a que o equipamento ou sistema permaneça indisponível.

2.3.3 Taxa de Falhas

É definida como o número de falhas por unidade de tempo, expressa usualmente em 10^6 horas.

$$\lambda = \frac{\text{número de falhas}}{\text{número de horas de operação}}$$

A curva característica da vida útil de um equipamento, também conhecida como curva da banheira, relaciona a taxa de falhas em função do tempo.

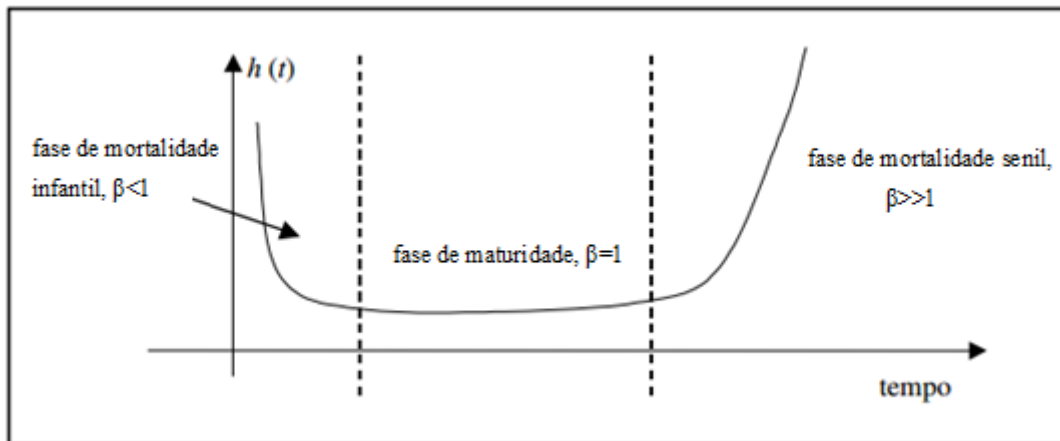


Figura 8. Curva Característica da Vida de Equipamentos (Curva da Banheira). Fonte: adaptado de Sellitto (2005 apud Wuttke, 2008).

Observa-se a distinção de três períodos:

- Mortalidade infantil: Grande número de falhas devido a erros de projeto (componentes defeituosos) e/ou problemas de instalação;
- Maturidade: Representa a vida útil do equipamento tendo taxa de falhas inferior e constante resultante de fatores não controláveis como fadiga e corrosão;
- Mortalidade senil: Aumento da ocorrência de falhas devido ao desgaste do equipamento pelo elevado tempo de uso.

2.3.4 Tempo médio entre falhas (TMEF)

É medido pela soma dos valores de tempo observados sem a ocorrência de falhas e o número de observações. Pode também ser calculado pelo inverso a taxa de falhas.

$$TMEF = \frac{1}{\lambda}$$

2.3.5 Tempo médio para reparo (TMPR)

O TMPR é um indicador importante pois está ligado à performance da Manutenção. O TMPR: depende da facilidade do equipamento em ser mantido e da capacitação do mantenedor na realização das intervenções. É medido como o inverso da taxa de reparos.

$$TMPR = \frac{1}{\mu}$$

e

$$\mu = \frac{\text{número de reparos efetuados}}{\text{tempo total de repado da unidade}}$$

Onde:

μ : é a taxa de reparo.

2.3.6 Eficiência Operacional Máxima ou *Overall Equipment Effectiveness* (OEE)

O indicador OEE foi desenvolvido pelo *Japan Institute of Plant Maintenance* tendo origem na TPM. Reflete as principais perdas relacionadas com o equipamento e quantifica a eficácia do mesmo na agregação de valor ao produto obtido. É uma medida de disponibilidade, performance e qualidade.

$$OEE = \text{Disponibilidade} \times \text{Performance} \times \text{Qualidade}$$

Onde:

Disponibilidade: envolve a perda por quebra/falha do equipamento ou por setup e ajustes para troca do modelo a ser fabricado.

Performance: é influenciado pela velocidade reduzida do equipamento e por ociosidade ou pequenas paradas.

Qualidade: contempla as perdas por problemas de qualidade, ou seja, quando o equipamento produz sucatas, e por queda de rendimento ou *start up*.

Faixa de valores de referência do OEE e seu impacto na competitividade da organização:

Faixa	Classificação do Processo produtivo	Competitividade
< 65%	Inaceitável	Baixíssima
65% a 75%	Irregular	Baixa
75% a 85%	Bom	Alta
85% a 95%	Muito bom	Classe mundial
> 95%	Excelência operacional	Classe mundial

Figura 9. Valores de OEE e sua influência na competitividade da organização. Fonte: Adaptado de ALVES 2011.

2.3.7 Backlog

Indicador que mede a efetividade do cumprimento da programação de manutenção pela relação entre o número de ações programadas e realizadas.

$$\text{Backlog (\%)} = \frac{AP - AR}{AP + AR} * 100$$

Onde:

AP = ações programadas

AR = ações realizadas

2.4 DISTRIBUIÇÃO DE WEIBULL

Há na literatura algumas formas de distribuição como a distribuição Exponencial, Lognormal, Weibull e Gama utilizadas para estimação de falhas. Entretanto a distribuição de probabilidade de Weibull segundo Fogliato, é a mais referenciada para uso em análise de confiabilidade e análise de sobrevivência de equipamentos industriais devido a sua versatilidade. Originalmente proposta por Waloddi Weibull em 1954, a distribuição de Weibull de dois parâmetros é comumente escrita em função de sua função densidade de probabilidade, f.d.p como:

$$f(t) = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t}{\eta} \right)^{\beta-1} e^{(-t/\eta)^\beta}$$

Onde:

β = parâmetro de forma ($\beta > 0$)

η = parâmetro de escala ($\eta > 0$)

Desta forma, considerando os conceitos básicos descritos anteriormente podemos definir as funções abaixo:

$$R(t) = e^{(-t/\eta)^\beta} \quad (\text{Confiabilidade})$$

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{R(t)} = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t}{\eta}\right)^{\beta-1} \quad (\text{Taxa de falhas})$$

O fator η está associado à dimensão da abscissa, valores crescentes de η tem a função de “esticar” a curva da f.d.p. O fator β está associado a posição na curva da banheira, sendo:

- $\beta < 1$: Mortalidade infantil
- $\beta = 1$: Maturidade
- $\beta > 1$: Mortalidade senil

A figura abaixo mostra a influência dos parâmetros de forma e escala para a função densidade de probabilidade.

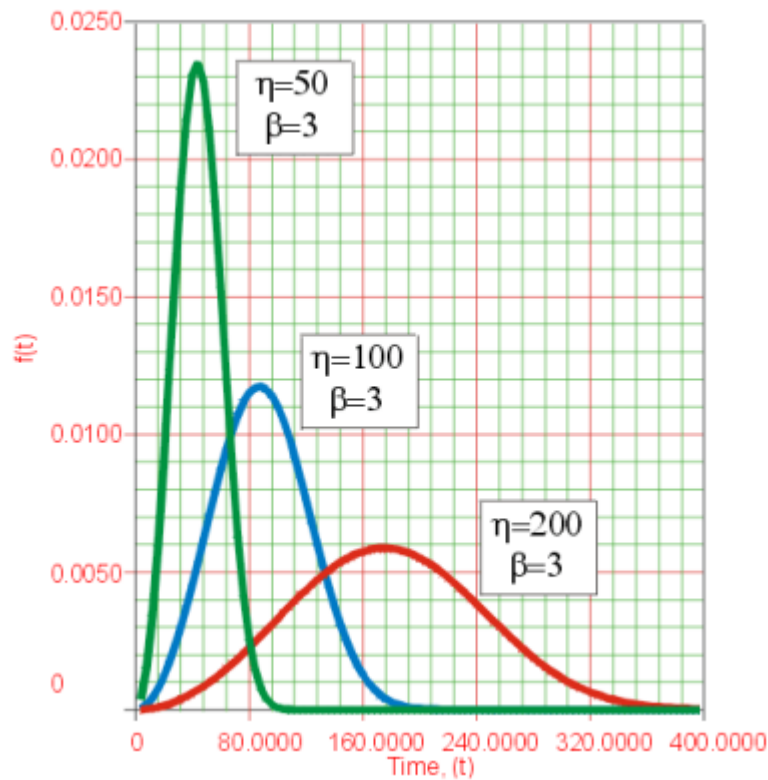


Figura 10. Função densidade de probabilidade de Weibull para valores distintos de η . Fonte: Hot Wire, The eMagazine for the Reliability Professional.

2.5 MANUTENÇÃO CENTRADA NA CONFIABILIDADE

2.5.1 Introdução

A Manutenção Centrada na Confiabilidade (MCC) é originária da indústria aeronáutica americana, na década de 60, como resultado de estudo realizado pela *Federal Aviation Administration* para manutenção programada de aviões *Boeing 747*, utilizando conceitos de confiabilidade. Para Fogliato (2011) “A confiabilidade de um item corresponde à sua probabilidade de desempenhar adequadamente o seu propósito especificado, por um determinado período de tempo e sob condições ambientais predeterminadas.”

Devido sua abordagem racional e sistêmica a MCC tem expandido sua aplicação em vários setores produtivos onde exista a necessidade de manter a função dos ativos físicos ou processos. Registros da ABRAMAN (2013) confirmam o crescimento da aplicação das técnicas da MCC nas empresas brasileiras desde 1997 como ferramenta para promover a qualidade.

Ferramentas Utilizadas para Promover a Qualidade (% de Respostas)								
Ano	MCC	5S	FMEA	RCFA	CCQ	TPM (MPT)	6 Sigma	Outros
2013	19,25	23,26	16,31	17,91	-	12,83	10,43	0,00
2011	17,03	27,86	17,34	15,79	-	12,69	9,29	0,00
2009	16,48	28,74	14,94	16,09	-	13,03	10,73	0,00
2007	18,65	27,22	22,02	17,13	-	10,09	0,92	3,98
2005	15,20	41,18	-	-	10,78	15,69	7,35	9,80
2003	20,31	37,50	-	-	8,33	16,15	5,73	11,98
2001	17,35	37,90	-	-	11,42	14,61	-	18,72
1999	5,62	40,45	-	-	16,29	20,79	-	16,85
1997	2,89	46,24	-	-	12,14	18,50	-	20,23
1995	-	39,83	-	-	17,37	21,61	-	21,19

Figura 11. Ferramentas utilizadas para promover a qualidade. Documento Nacional 2013 - ABRAMAN.

A MCC tem por objetivo determinar práticas eficazes de manutenção de forma a garantir confiabilidade do equipamento a um custo mínimo de recursos. Esta metodologia aborda aspectos que possam influenciar a produtividade e funcionalidade dos equipamentos avaliando os procedimentos de manutenção, análise dos modos e efeitos de falhas, classificação de criticidade, alocação de recursos e questões de segurança e meio ambiente. Sendo pois uma ferramenta de suporte a decisão gerencial.

2.5.2 Implementação

Furmann (2002) e Pinto & Xavier (2001), apud (ROSA, 2006, p. 74-75) afirmam que a abordagem clássica da MCC deve abordar as seguintes etapas:

- 1) Escolha do equipamento, sistema ou instalação, definindo com clareza suas fronteiras, interfaces e necessidades de modernização;
- 2) Análise dos modos e efeitos de falhas observando a ocorrência, gravidade e detectabilidade das falhas;
- 3) Decisão sobre a criticidade dos modos de falha e sobre a seleção das tarefas;
- 4) Determinação de ações de manutenção, através da elaboração de políticas, estratégicas e frequência de intervenções.

O sistema escolhido deve ser relevante do ponto de vista operacional e financeiro justificando a aplicação da MCC e o envolvimento da alta gerência. As funções padrões de desempenho determinam os requisitos de operação do equipamento que atendam satisfatoriamente às necessidades dos processos, sendo a base do estudo. Outro ponto importante considerado pela MCC são as formas com que o equipamento pode vir a falhar e as causas de cada falha. Em sua obra, Fogliato (2011) ressalta a necessidade de identificação das causas das falhas em suficiente detalhe para assegurar que as ações sejam dirigidas à raiz do problema e não aos sintomas que ele apresenta.

Definidas as causas das falhas é importante avaliar as consequências que cada falha pode trazer ao sistema de forma a definir um plano de ações eficaz, priorizando as atividades de manutenção preventiva e/ou corretiva necessárias para prevenir ou impedir tais falhas. Abaixo, tabela resumo e comparativa da visão de alguns autores sobre os passos requeridos para a implementação da MCC em uma indústria.

Etapas	Smith (1993)	Moubray (2000)	NASA (2000)	Rausand et al. (1998)
1	Seleção do sistema e coleta de informações	Definição das funções e padrões de desempenho	Identificação do sistema e suas fronteiras	Preparação do estudo.
2	Definição das fronteiras do sistema.	Definição da forma como o item falha ao cumprir suas funções.	Identificação dos sub-sistemas e componentes.	Seleção do sistema.
3	Descrição do sistema	Descrição da causa de cada falha funcional	Exame das funções	Análise das Funções e Falhas Funcionais - AFF
4	Funções e falhas funcionais	Descrição das consequências de cada falha.	Definição das falhas e dos modos de falha.	Seleção dos itens críticos
5	Análise dos modos, efeitos e criticidade das falhas	Definição da importância de cada falha.	Identificação das consequências da falha.	Coleta e análise de informações
6	Análise da árvore lógica.	Seleção de tarefas preditivas e preventivas para cada falha.	Análise do diagrama lógico de decisão.	Análise dos modos, efeitos e criticidade das falhas
7	Seleção das tarefas preventivas.	Seleção de tarefas alternativas.	Seleção das tarefas preventivas	Seleção das tarefas de manutenção.
8				Determinação da frequência das tarefas de Manutenção.

Figura 12. Etapas de implementação da RCM. Fonte: ZAION (2003), apud SOUZA. F. J

A análise de falhas através da MCC traz como benefícios o aumento do conhecimento sobre as funções do equipamento, maior confiabilidade e disponibilidade, desenvolvimento de sinergia e capacidade de investigação da equipe e melhor planejamento da manutenção. O sucesso desta metodologia depende do comprometimento dos envolvidos, da capacitação da equipe, de uma análise sistêmica e crítica relativo à ocorrência e identificação de falhas bem como do registro documental das atividades de manutenção realizadas.

2.5.3 Análise de Falhas

O objetivo principal da análise de falhas é evitar que novas falhas venham a ocorrer. A investigação deve determinar as causas básicas da falha obtendo informação suficiente que permita a introdução de ações que impeçam a repetição do problema. Caso contrário a análise das causas não possui utilidade alguma, sendo impossível aplicação de melhorias ao sistema.

Afonso Luiz afirma que “Analisar uma falha é interpretar as características de um sistema ou componente deteriorado para determinar porque ele não mais executa sua função com segurança.” A análise das falhas revela causas físicas que segundo descrito no ASM

HANDBOOK, 2002, p.24, podem ser categorizadas como: defeitos de projeto, defeitos de materiais, defeitos de fabricação/instalação e anomalias de vida útil. Kardec & Nascif (2011) enfatizam que ocorrência de uma falha no sistema pode resultar na redução ou interrupção da produção, operação instável, queda na qualidade do produto e perda da função e proteção do equipamento. Abaixo alguns conceitos sobre falhas:

- Falha prematura ocorre antes do fim da vida útil para tal modo de falha;
- Falha oculta somente é observada quando equipamento é posto em funcionamento, geralmente ocorre em componentes de segurança.
- Ponto fraco é o componente que não é responsável pela falha mas faz agravar suas causas;

Na literatura encontra-se algumas técnicas para aumento da confiabilidade pela análise de falhas, como: Análise do Modo e Efeito de Falha (FMEA), Árvore de falhas e Metodologia de Análise e Solução de Problemas (MASP) abaixo apresentadas.

2.5.3.1 Análise de Modo de Efeito de Falha (FMEA)

Mais conhecido pela sigla em inglês FMEA – *Failure Mode and Effect Analysis*, é uma técnica que busca identificar e priorizar falhas potenciais segundo alguns critérios padrões de forma a se evitar a ocorrência das possíveis falhas levantadas pela análise. Logo o FMEA tem função preventiva de antecipação a falha. Pode ser segmentado em três níveis: projeto, processo e sistema.

- FMEA para projeto: realizado no momento de desenvolvimento do equipamento busca levantar causas de possíveis falhas nesta etapa levando em consideração aspectos de manutenibilidade e segurança;
- FMEA para processos: tem foco na maneira como o equipamento é solicitado, nas formas de operação e manutenção;
- FMEA para sistemas: é utilizado para analisar falhas potenciais e gargalos em um processo global e seus subsistemas.

O levantamento de questões como a frequência e ocorrência das falhas, sua gravidade e possibilidade de ser detectada permite a priorização das falhas através do cálculo do IRF – índice de risco de falha, dado por:

$$IRF = \text{Frequência} \times \text{Gravidade} \times \text{Detectabilidade}$$

Neste caso cada item recebe uma pontuação numa escala natural crescente de 1 a 10 seu aspecto. A escolha da pontuação é feita pela experiência dos observadores. Pinto &

Xavier (2001) apud (ROSA 2006, p.70) recomendam a pontuação segundo descrito na tabela abaixo.

Componente do IRF	Classificação	Peso
Ocorrência (O)	Muito Baixa	1
	Baixa	2, 3
	Moderada	4, 5, 6
	Alta	7, 8
	Muito Alta	9, 10
Gravidade (G)	Muito Baixa	1
	Baixa	2, 3
	Moderada	4, 5, 6
	Alta	7, 8
	Muito Alta	9, 10
Detectabilidade (D)	Muito Fácil	1
	Fácil	2, 3
	Moderada	4, 5, 6
	Difícil	7, 8
	Muito Difícil	9, 10

Figura 13. Escala de avaliação para o FMEA. Fonte: Pinto & Xavier (2001) apud (ROSA 2006, p.70)

A sequência de trabalho para elaboração do FMEA compõe-se das seguintes tarefas:

- 1) Isolar e descrever os modos de falha determinando as condições em que o equipamento pode falhar;
- 2) Descrever o efeito da falha em termos de produção, qualidade e prejuízos;
- 3) Determinar a frequência, a gravidade e detectabilidade da falha;
- 4) Calcular o IRF;
- 5) Determinar e executar ações para eliminar ou corrigir o problema.

2.5.3.2 Árvore de Falhas

A Árvore de Falhas ou do inglês FTA – *Failure Tree Analysis* é uma técnica lógica que aborda todas as combinações possíveis de falha dos componentes que possam ter levado o sistema a falhar. A análise é iniciada pela falha observada (evento topo ou resultante) continuando pela ramificação das possíveis causas (eventos básicos) interligados à falha pelos nós de dependência E/OU (operadores lógicos). Em um nó do tipo E é necessário que todas as

causas ramificadas neste ponto devem ocorrer para a observação da falha. Em um nó tipo OU apenas um dos eventos básicos precisam ocorrer.

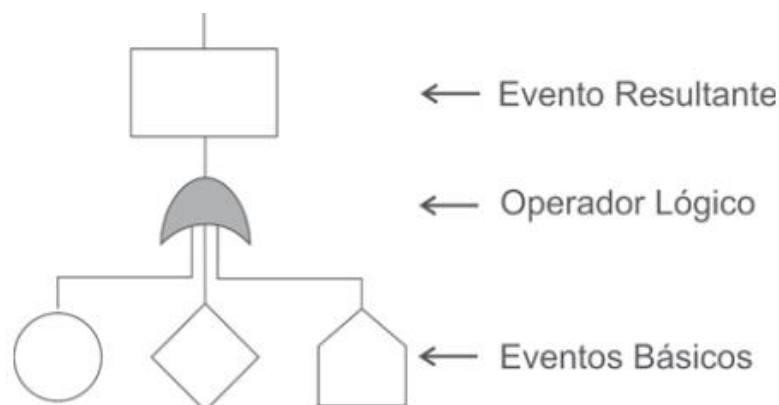


Figura 14. Exemplo básico da estrutura de uma árvore de falhas. Fonte: Fogliato (2011).

Para análise de falhas pelo FTA deve-se primeiramente fazer a construção da árvore de falhas analisando detalhadamente as possíveis causas que levaram a falha. Posteriormente deve-se analisar a probabilidade da ocorrência dos eventos básicos para determinação de criticidade. Por fim deve-se elaborar os planos de ação priorizados pela criticidade avaliada com definição de prazos e acompanhamento das atividades.

“As ações de correção e melhoria podem contemplar a revisão do desenho de partes do projeto, revisão de especificações de materiais, revisão dos procedimentos de manufatura e montagem, a incorporação de novos procedimentos, a incorporação de novos controles, o uso de tecnologias alternativas, a intensificação das atividades de manutenção preventiva ou preditiva etc.”

FOLGIATO (2011).

2.5.3.3 Metodologia de Análise e Solução de Problemas (MASP)

A MASP é uma técnica desenvolvida pelos japoneses e utilizada na Gestão da Qualidade Total para a busca da causa fundamental da ocorrência da falha utilizando o método do PDCA – *Plan* (planejar), *Do* (realizar), *Check* (verificar) e *Action* (corrigir). A figura abaixo sintetiza as etapas de elaboração da MASP segundo o autor Campos (2009), apud (ROSA 2006, p.72).

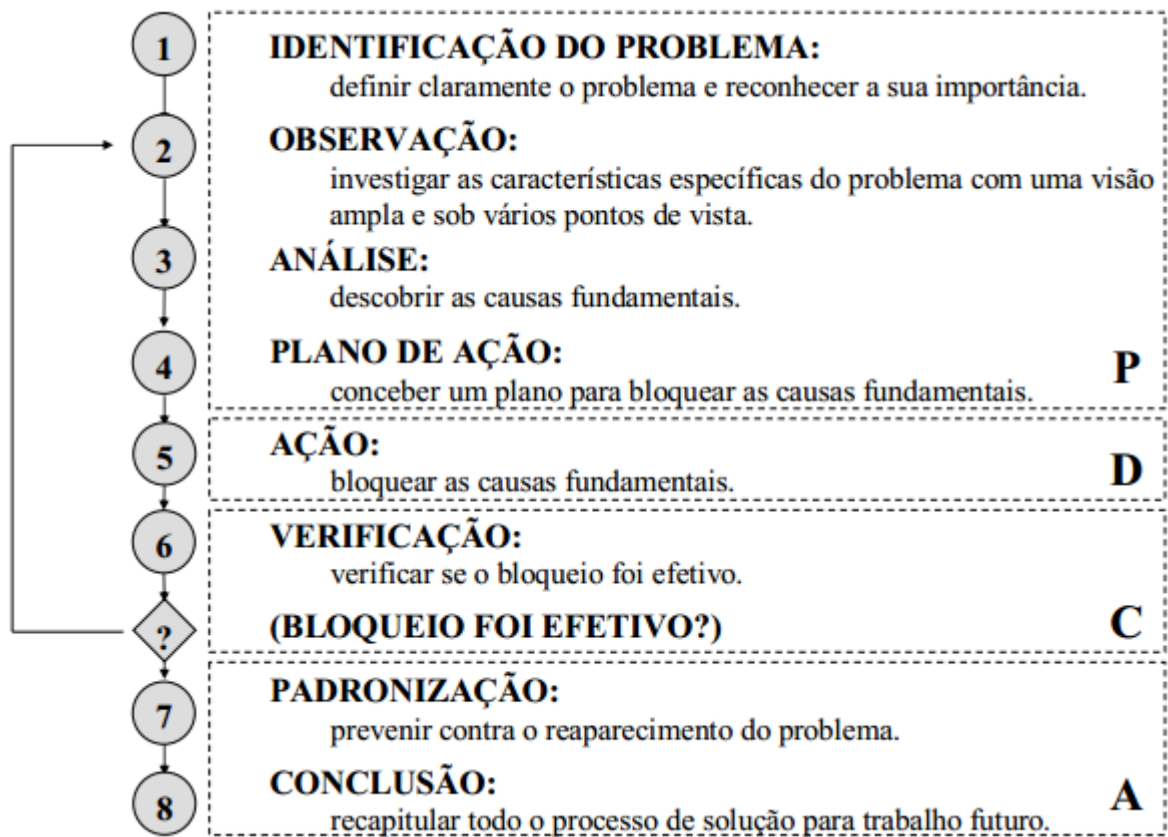


Figura 15. Etapas de implementação da MASP. Fonte: Campos (2009), apud (ROSA 2006, p.72).

3. ESTUDO DE CASO

Neste capítulo é apresentado uma breve descrição do grupo Votorantim e da unidade fabril Votorantim Metais Zinco – Unidade Juiz de Fora, em que se realizou o estudo de caso trazendo ainda uma contextualização do papel da manutenção na unidade. É feita uma pequena introdução sobre turbinas a vapor e apresentação do equipamento para estudo. Por fim é apresentado, mais detalhadamente, a descrição dos procedimentos adotados para desenvolvimento e análise do projeto.

3.1 O GRUPO VOTORANTIM

O Grupo Votorantim é um conglomerado industrial 100% brasileiro fundado em 1918 pelo engenheiro pernambucano José Ermírio de Moraes. Atualmente está presente em mais de vinte países operando nos seguintes segmentos industriais: Agroindústria, Celulose, Cimentos, Energia, Metais e Siderurgia. No ramo financeiro opera por meio da Votorantim Finanças (VF), que reúne as instituições como o Banco Votorantim (banco de negócios e de investimento) e o BV Financeira (financiamento e crédito ao consumidor).

3.1.1 Votorantim Metais Zinco

A Votorantim Metais Zinco é empresa líder na produção de zinco metálico na América Latina e um dos maiores produtores mundiais do metal e seus derivados, contando atualmente com dez unidades e uma capacidade produtiva de 730 mil toneladas por ano. Busca a autossuficiência em concentrado de zinco e auto geração de energia garantindo o abastecimento de clientes.

3.1.2 Votorantim Metais Zinco – Juiz de Fora (VMZ-JF)

Inicialmente pertencente a Companhia Paraibuna de Metais, construída em janeiro de 1975 e posteriormente integrada ao Grupo Paranapanema em fevereiro de 1996. A planta de Juiz de Fora foi então adquirida pelo Grupo Votorantim no ano de 2002, promovendo ações estratégicas de crescimento e fortalecimento no negócio zinco. A unidade de Juiz de Fora conta atualmente com uma capacidade produtiva de cerca de 120 mil toneladas de zinco metálico por ano. Os produtos são vendidos para o mercado interno e externo na forma de

lingotes de zinco altamente puro e ligas de zinco contendo alumínio, magnésio e cobre. Como produtos secundários são ainda produzidos concentrado de prata, dióxido de enxofre, ácido sulfúrico e sulfato de cobre.

A obtenção do zinco metálico se dá pelo processamento da matéria-prima, concentrado de zinco sulfetado, e secundários, óxido de latão e pó de aciaria elétrico, em etapas subsequentes. Primeiramente as matérias-primas são adicionadas em um forno ustulador produzindo o ustulado. Nesta etapa são retirados gases com enxofre que posteriormente resultarão nos subprodutos dióxido de enxofre e ácido sulfúrico. O ustulado segue para uma etapa de lixiviação onde se obterá solução pura de sulfeto de zinco e solução impura. A solução impura segue para tratamento onde são recuperados os subprodutos sulfato de cobre e concentrado de prata. A solução pura de sulfeto de zinco segue para o processo de eletrólise onde o zinco puro é extraído em forma sólida em folhas catódicas. Estas são processadas na fundição para obtenção de lingotes de zinco altamente puro e ligas metálicas.

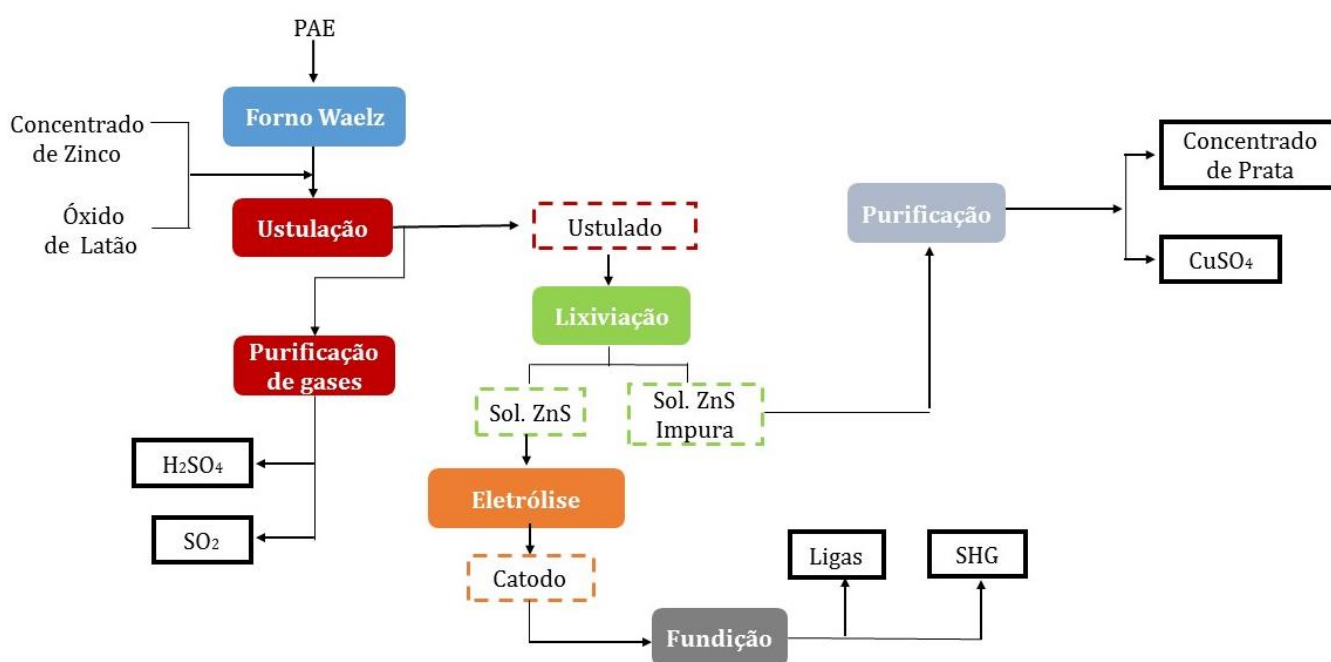


Figura 16. Fluxograma do processo de obtenção do zinco metálico, VMZ-JF. Fonte: elaborado pelo próprio autor.

3.1.3 O contexto da Manutenção na VMZ-JF

A Votorantim Metais Zinco – unidade Juiz de Fora conta com equipe multidisciplinar de manutenção, composta por colaboradores próprios e terceirizados coordenados pela gerência de Engenharia de Manutenção. Adota-se a prática da Manutenção

Baseada na Condição, com inspeção e monitoramento dos parâmetros dos equipamentos para melhor determinar o momento de intervenção/substituição antes da falha ocorrer. O método de avaliação da criticidade dos ativos é realizado pela classificação ABC, auxiliando a priorização de atendimento à demanda e tomadas de decisão. Ferramentas como a manutenção autônoma, a TPM (*Total Productive Maintenance*) e uso de indicadores são também existentes na unidade o que reforça o fato de maior preocupação na atuação em manutenção preventiva à corretiva.

Todos os procedimentos de manutenção seguem um Padrão Gerencial (PG) desenvolvido pela empresa. O Sistema de Gestão Votorantim Metais, mostrado na figura a seguir, está estruturado em Sete Pilares, os quais deverão ter atuação matricial permeando todos os processos produtivos.



Figura 17. Sistema de Gestão da manutenção. Fonte: fornecido pela empresa.

O sistema integrado de gestão empresarial (ERP) da SAP, permite o acompanhamento das ordens de manutenção e registro de dados promovendo maior organização de informações, segurança no armazenamento de registros, histórico de manutenções e identificação dos equipamentos (TAG). Logo, viabiliza e facilita a elaboração

de indicadores de manutenção confiáveis permitindo melhor gerenciamento das atividades de manutenção.

3.1.4 Processo de Ustulação

O processo de Ustulação é o mais importante da planta. A matéria prima é ustulada no forno ustulador a aproximadamente 900°C resultando em ZnO , também denominado ustulado. Deste processo resultam gases a alta temperatura contendo enxofre que seguem para a caldeira de recuperação térmica. A caldeira refrigerada a água é responsável por baixar a temperatura dos gases, tendo como consequência a geração de vapor. Os gases seguem para processo de recuperação e o vapor é utilizado como fonte de calor em processo subsequente. O processo de Ustulação é acompanhado online via telas de controle. O sistema de monitoramento lê as informações capturadas pelos sensores instalados nos equipamentos, exhibe nas telas de controle e armazena os dados num sistema remoto permitindo a consulta destes a qualquer instante e para qualquer intervalo de tempo estabelecido. Nem todos os equipamentos são monitorados.

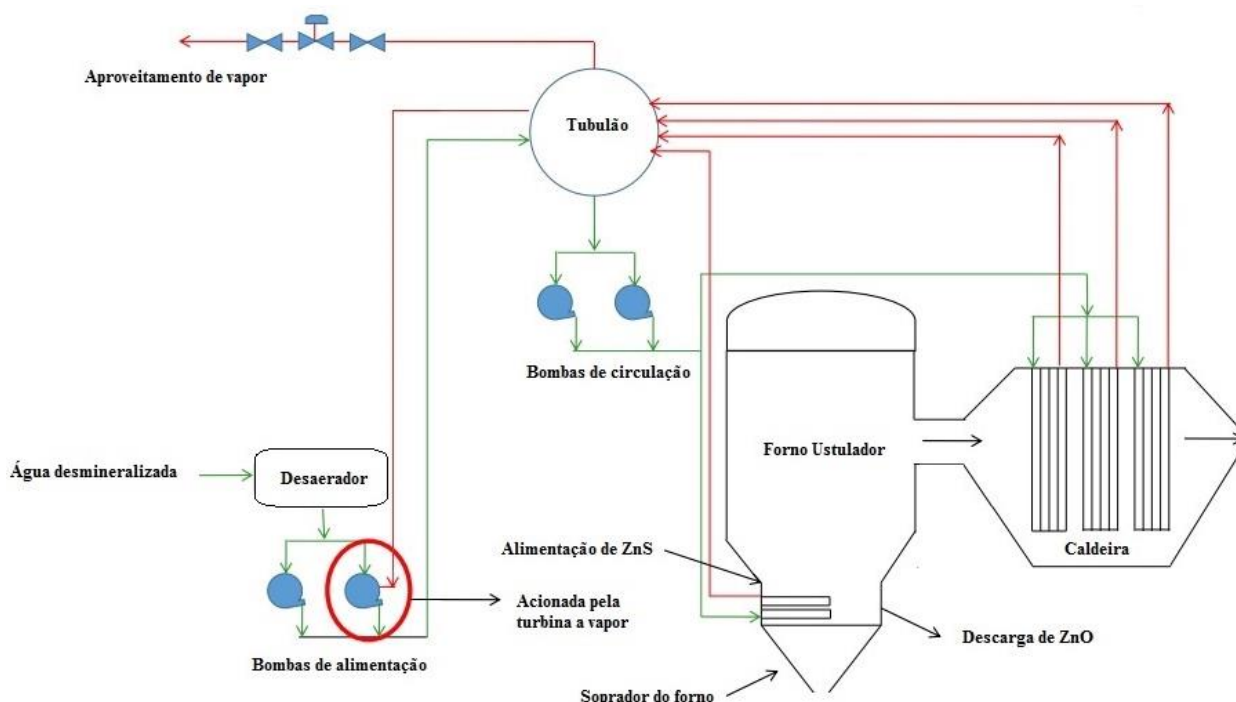


Figura 18. Esquema simplificado do processo de ustulação. Fonte: adaptado de Votorantim Metais (VMZ-JF).

O sistema de alimentação de água da caldeira é composto por sistema de alimentação operante (motor elétrico – bomba hidráulica) e um sistema de segurança (turbina a vapor – bomba hidráulica) dispostos paralelamente no circuito, de forma que na falha do sistema

elétrico o sistema de segurança possa atuar mantendo a alimentação de água da caldeira. O acionamento da turbina é feito imediatamente após a falta de energia pela abertura automática de válvula do tipo NF – normalmente fechada. Uma linha de vapor secundária é conectada a turbina permitindo seu acionamento.

3.2 TURBINA A VAPOR

Turbina a vapor é uma máquina motriz que utiliza a energia proveniente de vapor expandido em alta velocidade, fazendo com que forças atuantes nas palhetas devido a variação de velocidade desenvolvam um momento resultante, girando assim o eixo do rotor. As turbinas a vapor são comumente utilizadas em plantas industriais acopladas a geradores elétricos, turbobombas, sopradores, etc. Segundo Macintyre, 1997 podem ser classificadas quanto:

1. Modo de atuação do vapor:

- Ação: quando o vapor se expande unicamente em órgãos fixos (boquilhas ou diretrizes expansoras) de modo que a pressão na face das palhetas não varia sensivelmente;
- Reação: quando o vapor se expande também no rotor, de modo que a pressão à entrada é maior que na saída;
- Mistas: quando parte inicial da turbina é construída para ação (alta pressão) e a outra como turbina de reação.

2. Trajetória descrita por uma partícula de vapor em relação à base da turbina:

- Axiais: o vapor flui axialmente de boquilhas dispostas radialmente no rotor;
- Radiais: o vapor se dirige radialmente através de canais formados por palhetas móveis dispostas radialmente;
- Tangenciais: o escoamento no rotor é uma composição de escoamento radial e axial.

3. Número de estágios:

- Único estágio: de único rotor
- Múltiplos estágios: de dois ou mais rotores.

4. Número de pás sobre as quais incide o vapor:

- Admissão total: quando o vapor enche por completo a coroa das pás;
- Admissão parcial: quando o vapor incide inicialmente sobre uma parte da coroa.

5. Condições do vapor no escape da turbina:

- Escape livre: escape diretamente na atmosfera;
- Condensação: o vapor de escape segue para um condensador;
- Contrapressão: o vapor de escape, com pressão sensivelmente superior à atmosfera, segue para dispositivos especiais para posterior utilização, como na calefação.
- Combinadas: parte do vapor é extraído antes de sua total utilização e conduzido para outros dispositivos.

3.3 EQUIPAMENTO DE ESTUDO

Foi escolhido para estudo uma turbina a vapor situada no setor de Ustulação da unidade caracterizada como equipamento crítico, tipo classe A. Opera como equipamento de segurança para acionamento da bomba alimentação de água da caldeira de recuperação em caso de falta de energia elétrica.

É caracterizada como turbina de reação, de fluxo radial, múltiplos estágios e de contrapressão alimentada a vapor vivo. Desenvolvido pela empresa alemã *Kühnle, Kopp & Kausch* (KKK) atualmente pertencente à *Siemens*, o modelo tratado, BF4/50, possui a seguinte especificação de serviço:

Potência máxima	795kW
Rotação	3500rpm
Pressão ideal de vapor vivo	40bar
Temperatura de vapor vivo	250°C
Pressão do vapor de escape	5bar
Temperatura de vapor de escape	160°C



Figura 19. Turbina de acionamento da bomba de alimentação de água da caldeira de recuperação de gases da Ustulação. Fonte: fornecido pela empresa.

A escolha do equipamento se deu pela compatibilidade com os requisitos propostos pela política da RCM, a saber: importância no contexto industrial, sendo alocada no setor mais crítico da unidade (Ustulação); equipamento crítico, classe A; necessidade de alta confiabilidade por ser este um equipamento de segurança; de alto valor e alto custo de manutenção. Outros fatores decisivos para escolha do equipamento foram o acontecimento de falha recente e falta de monitoramento do equipamento.

3.4 DESCRIÇÃO DOS PROCEDIMENTOS DE ANÁLISE

Para aplicação dos conceitos da MCC levantados na pesquisa bibliográfica, uma vez determinado o equipamento de estudo, iniciou-se com o levantamento de dados de falha do mesmo. Posteriormente escolheu-se o modelo matemático de *Weibull*, de dois parâmetros, como função de ajuste para ocorrência das falhas. Utilizou-se o *software* Synthesis Platform versão 10 da empresa ReliaSoft para simulação dos dados.

Os dados foram tratados e inseridos na ferramenta Weibull++ do *software* para determinação dos parâmetros *eta* (η) e *beta* (β). Determinou-se a configuração do sistema de alimentação de água da caldeira e, utilizando a ferramenta BlockSim do *software* construiu-se um sistema em diagrama de blocos de confiabilidade. Os parâmetros η e β serviram de entrada para caracterização dos equipamentos.

Uma vez definido o problema, foi possível a plotagem dos gráficos de confiabilidade, taxa de falhas entre outros. De forma simultânea, fez-se a análise da árvore de falhas e do plano de ação; determinação da disponibilidade dos equipamentos; verificação do plano de manutenção e leitura do manual de operações e manual do equipamento.

Com base em uma confiabilidade padrão requerida pelo sistema de alimentação de água da caldeira foi possível determinar o tempo para manutenção da turbina, bem como a confiabilidade requerida pela mesma. A figura representa de forma sintetizada a metodologia utilizada.

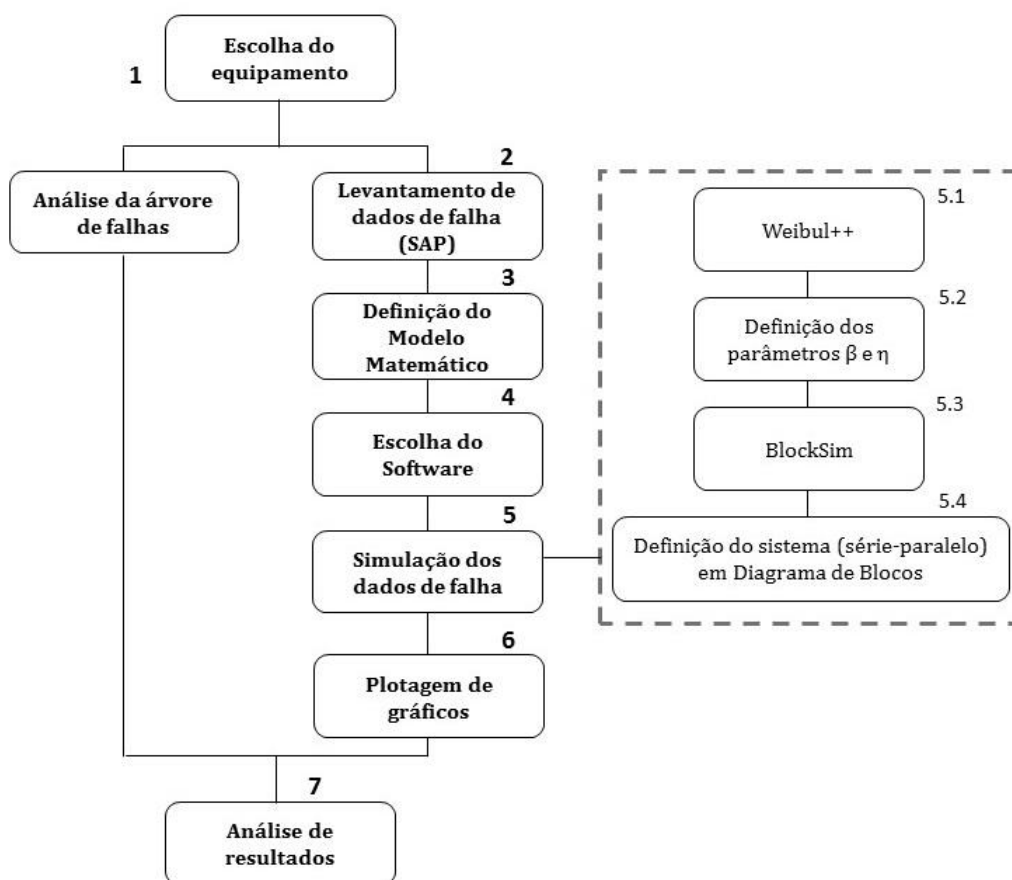


Figura 20. Fluxograma da metodologia utilizada no estudo de caso. Fonte: desenvolvido pelo próprio autor.

3.4.1 Levantamento de dados

Inicialmente prosseguiu-se com levantamento de dados de manutenções corretivas requerido pela turbina nos últimos 5 anos para análise histórica do equipamento e entendimento de seu status atual. Devido a importância do setor de Ustulação e da necessidade de se manter condições que permitam o bom funcionamento da caldeira e da alocação da turbina 5/40 em estudo no circuito de alimentação de água desta, prosseguiu-se

com o levantamento de dados do conjunto de alimentação de água da caldeira formado por bomba hidráulica de acionamento via motor elétrico ou a turbina a vapor.

Os dados foram extraídos do banco de dados do sistema SAP ERP, sistema de informação que integra todos os dados e processos da organização permitindo a automação e armazenamento de dados. Observado a política da RCM estabeleceu-se os indicadores relevantes para análise de confiabilidade proposta, a saber: confiabilidade para 10% de falha do equipamento, taxa de falha e vida média.

3.4.2 Análise de dados e formulação do problema

De posse dos dados de falha da turbina e dos demais equipamentos que compõe o sistema de alimentação de água da caldeira prosseguiu-se com análise de vida dos mesmos. Utilizou-se para simulação o *software* da empresa ReliaSoft, *Synthesis Platform* versão 10, que integra ferramentas de confiabilidade. Atribui-se a equação de probabilidade de Weibull de 2 parâmetros como ferramenta de ajuste à distribuição de falhas ocorridas no equipamento, sendo esta a mais utilizada em estudos de confiabilidade encontrado na literatura.

Utilizando a ferramenta Weibull++ da plataforma foi possível calcular os parâmetros *eta* (η) e *beta* (β) que caracterizam o estado do equipamento. Adotou-se um sistema de estratificação das falhas em falhas independentes para possibilitar a correta utilização da equação de Weibull.

Prosseguiu-se com a estruturação de sistema em diagramas de bloco utilizando a ferramenta BlockSim do *software*. O que, com a inserção dos parâmetros ditos, permitiu a caracterização individual dos equipamentos e do sistema de alimentação da caldeira por meio de gráficos de confiabilidade, probabilidade de falha, função densidade de probabilidade e taxa de falha em função do tempo.

3.4.3 Análise de falha

Ocorrida em abril de 2016, a falha se deu pelo travamento da turbina a vapor de acionamento da bomba de alimentação de água da caldeira de recuperação da Ustulação. Não foi observado tempo de parada visto que a falha foi identificada durante um procedimento padrão de verificação da funcionalidade do equipamento. Este encontrava-se fora de operação por ser um equipamento de segurança, não havendo no determinado instante a necessidade de

solicitação do mesmo. Entretanto, visto a importância do mesmo prosseguiu-se ao estudo de interpretação da falha ocorrida.

Utilizou-se o *software* RCPro com a metodologia *RealityCharting* para construção da Árvore de Falhas, método de análise de falhas escolhido. Dispôs-se de equipe multidisciplinar de seis envolvidos, contratados e terceirizados, composta por engenheiros, técnicos em manutenção e operador.

3.4.4 Elaboração de Plano de Ação

A investigação da falha ocorrida levou a identificação das causas que levaram a ocorrência do evento. Permitiu a elaboração de planos de ação de natureza preventiva e corretiva a fim de corrigir os efeitos gerados e melhorar as condições de operação e manutenção do equipamento, evitando a ocorrência de falhas futuras.

4. RESULTADOS

4.1 RESULTADOS ALCANÇADOS

O levantamento de dados permitiu o cálculo da disponibilidade dos equipamentos, como mostrado na tabela 1.

Tabela 1. Disponibilidade das máquinas que compõe o sistema de alimentação de água da caldeira.

Máquina	MTBF	MTTR	Disponibilidade (%)
TBN 04	130 dias	4,4 horas	99,888
BOM 04	127 dias	4,0 horas	99,869
SEL 01	350 dias	2,3 horas	99,972

A introdução dos dados de falha na ferramenta Weibull++ permitiu o cálculo de *eta* e *beta* que serviram como parâmetros de entrada para simulação em diagrama de bloco (RBD - *Reliability Block Diagram*) pela ferramenta BlockSim. O diagrama abaixo exhibe a configuração do sistema de alimentação da turbina, dispondo de sistema de alimentação operante (motor elétrico-bomba hidráulica) e sistema de segurança (turbina a vapor – bomba hidráulica) postos paralelamente no circuito com a condição de que na falha do sistema de alimentação o sistema de segurança deve atuar.

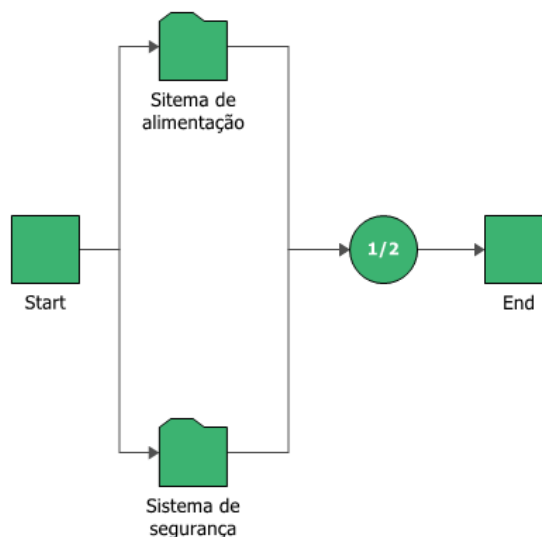


Figura 21. *Reliability Block Diagram* (RBD). Fonte: elaborado pelo próprio autor com uso da ferramenta BlockSim do *software Synthesis Plataforma*.

A partir do diagrama acima o *software* é capaz de analisar os relacionamentos dos componentes e formular matematicamente a Confiabilidade resultante. É possível visualizar graficamente o comportamento do sistema ao longo do tempo quanto a Confiabilidade.

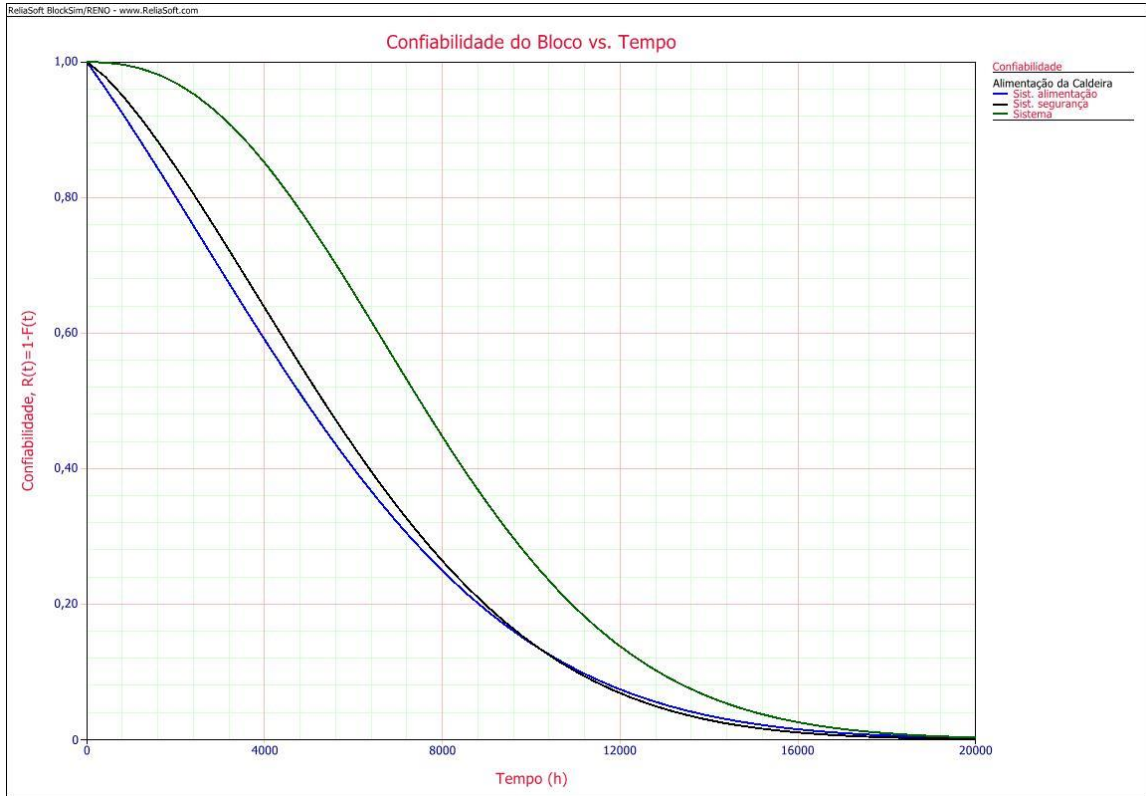


Figura 22. Confiabilidade do sistema em função do tempo. Fonte: resultado de simulação pela ferramenta *BlockSim* do *software Synthesis Platform*.

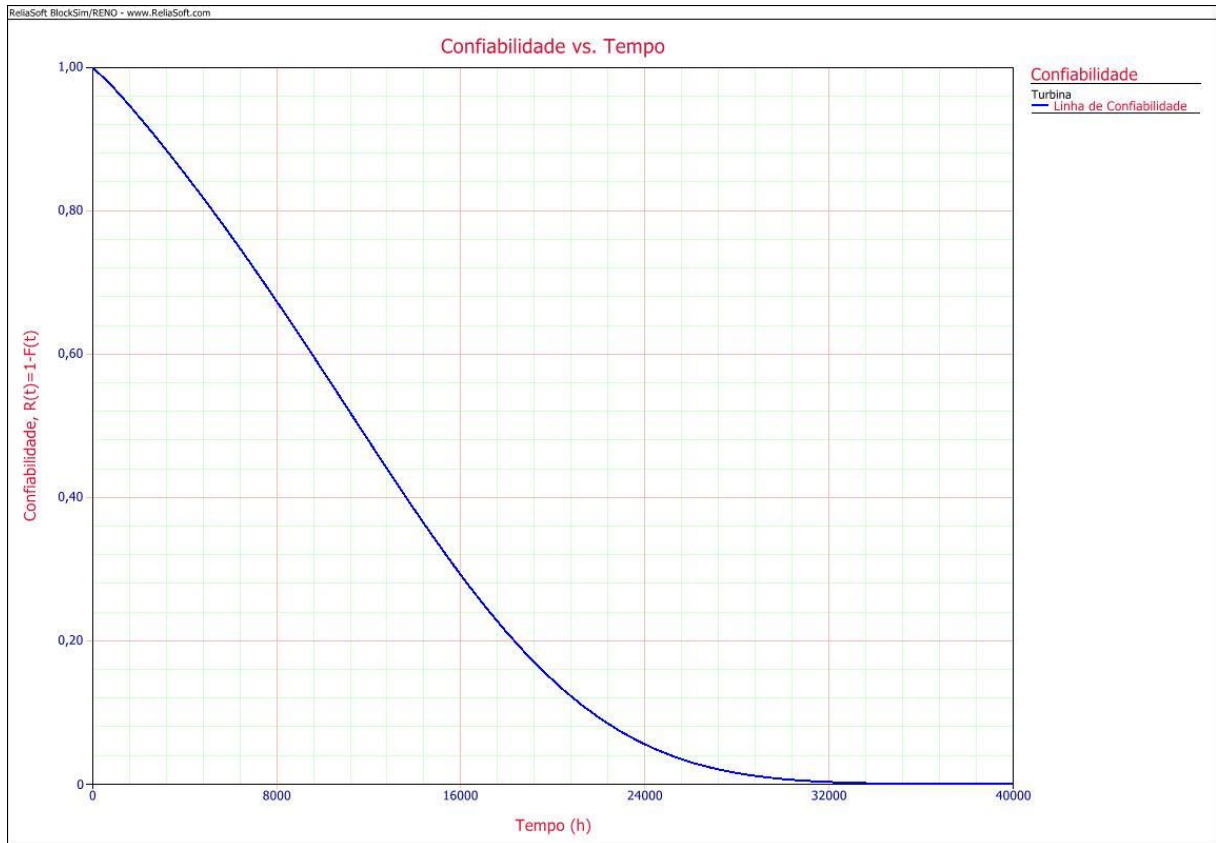


Figura 23. Confiabilidade da turbina em função do tempo. Fonte: resultado de simulação pela ferramenta *BlockSim* do software *Synthesis Platform*.

A confiabilidade do sistema é dependente de seus componentes e do arranjo do circuito. É observado no gráfico da figura 21 que o sistema em paralelo resulta numa confiabilidade maior que a de seus componentes, o que é comprovado pelo modelo teórico.

Dado como função padrão da caldeira funcionar com uma confiabilidade 99% foi possível identificar na figura 21 a confiabilidade requerida pelos sistemas de alimentação de 88% e de segurança de 92% para um tempo correspondente de 1224 horas ou 51 dias. Diante disso foi possível encontrar a partir da figura 22 a confiabilidade requerida pela turbina de 96%.

Com os resultados da simulação foi possível a construção da tabela 2, onde se pode visualizar os parâmetros resultantes da distribuição de Weibull no modelo em estudo.

Tabela 2. Parâmetros de Weibull para o modelo em estudo. Fonte: elaborado pelo próprio autor.

Modelo de Weibull a dois parâmetros						
	TBN 04	BOM 04	SEL 01	SALI	SSEG	Sistema
β	1,445	1,639	0,9313	1,258	1,461	2,298
η (dias)	570,74	342,35	782,46	259,01	274,18	369,12
MTTF	500,82	302,99	808,66	233,37	243,84	327,65
B 10	117,43	87,4	69,82	43,38	58,71	139,27
B 50	482,00	280,23	527,89	204,51	221,56	312,16

A ferramenta permitiu ainda a determinação do tempo para dadas confiabilidades como mostrado na tabela 3.

Tabela 3. Confiabilidade da turbina e do sistema em função do tempo. Fonte: elaborado pelo próprio autor.

Confiabilidade R(t) - dias						
%	99	98	97,5	97	96,5	96
TBN 04	15,2	28,03	34,16	40,15	40,04	51,84
Sistema	51,13	69,02	76,000	82,24	87,92	93,16

A falha da turbina quando em procedimento teste levou à elaboração da Árvore de Falhas abaixo, onde foi identificado quatro causas básicas que podem ter levado à falha do equipamento.

1. Montagem inadequada da bomba de óleo;
2. Óleo contendo impurezas;
3. Passagem de vapor pela válvula reguladora de emergência;
4. Operação/teste inadequado do equipamento.

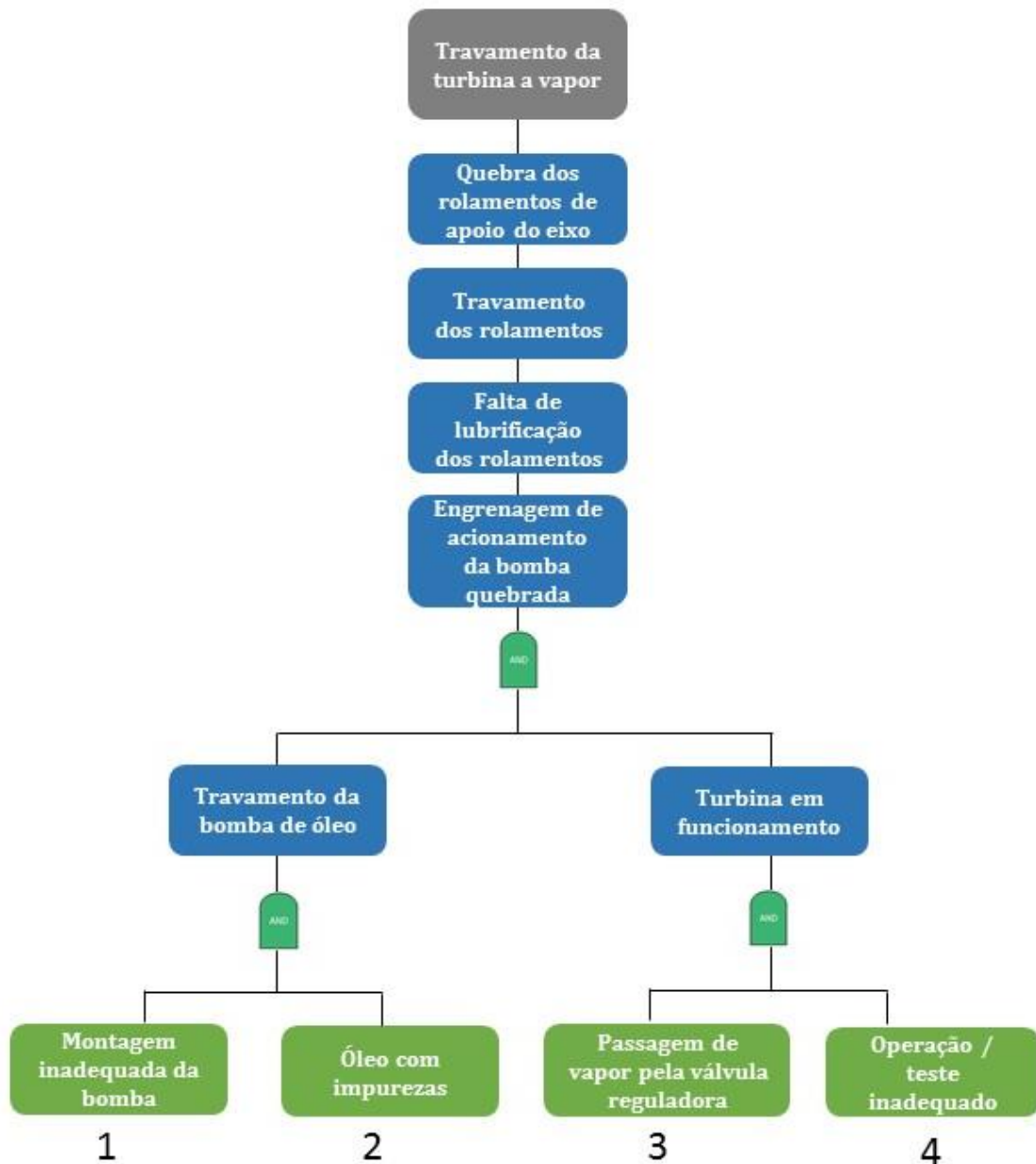


Figura 24. Árvore de Falha: travamento da turbina a vapor. Fonte: fornecido pela empresa.

Possivelmente a falta de lubrificação dos rolamentos resultou em desgaste do eixo próximo ao anéis de vedação e levou ao aquecimento dos rolamentos. O aumento da temperatura fez com que estes se expandissem causando o travamento e posterior quebra. Sem apoio dos rolamentos o eixo girou livremente causando um desbalanceamento do sistema rotativo. O rotor entrou em contato com a carcaça levando ao desgaste da voluta, do bico injetor de vapor e das palhetas.



Figura 25. Componentes da turbina após desmontagem para investigação da falha. Fonte: fornecido pela empresa.

Como base nas causas base encontradas pela Árvore de Falhas da turbina estabeleceu-se planos de ação de curto e longo prazo a fim de corrigir a falha e evitar sua ocorrência futura. Algumas das ações estabelecidas seguem resumidamente na tabela abaixo.

Plano de ação		
Causa	Descrição	Prazo
4	Revisar procedimento de teste	Médio
3	Revisar plano de manutenção	Longo
3 e 4	Instalar sistema de monitoramento online	Médio
-	Promover limpeza dos equipamentos da casa de bombas	Curto
-	Fazer encapsulamento da turbina	Curto
-	Reparar partes danificadas	Curto

Figura 26. Resumo do plano de ação estabelecido pela análise de falhas. Fonte: adaptado de VMZ-JF.

4.2 DISCUÇÃO DOS RESULTADOS

Observou-se que o sistema de segurança do circuito de alimentação de água da caldeira, composto pelo sistema de bombeamento turbina a vapor-bomba hidráulica, possui maior confiabilidade que o sistema de alimentação operante, motor elétrico - bomba hidráulica. Isto justifica a configuração adotada para o sistema de segurança atual e sugere a continuação do mesmo. Entretanto, identificou-se a necessidade de melhoria do mesmo diante da falha da turbina enquanto em procedimentos de teste. A possibilidade de substituição da

turbina por motor elétrico ligado a geradores de emergência foi cogitado. Entretanto sendo o acionamento por geradores elétricos de emergência realizado manualmente, a partida do equipamento não é imediata, levando a conclusão da não viabilidade desta hipótese.

A melhoria das condições de serviço da turbina como o encapsulamento, visa eliminar a possibilidade de particulados de Ustulado de zinco adentrem no sistema de bombeamento de óleo. Estas partículas podem levar à perda da função do lubrificante podendo causar desgaste do eixo e dos mancais. O monitoramento online por meio da medição de rotação por tacômetro permite identificar o correto funcionamento do conjunto bomba turbina para a vazão de vapor atuante.

É realizado diariamente um procedimento para verificação de funcionamento do equipamento a uma rotação de 3.500 rpm. Semanalmente é simulado por uma hora a falta de energia elétrica pela equipe da Ustulação. A revisão do procedimento de teste diário e semanal pela equipe de manutenção, assim como as atividades preventivas de lubrificação e inspeção preditiva, faz-se necessário. Sugere-se a medição de vibrações por equipamento portátil durante os procedimentos de teste do equipamento. Isto permite identificar possíveis danos como desalinhamento, lubrificação ineficiente e desgaste, colaborando para a efetividade da manutenção preventiva.

5. CONCLUSÕES

O objetivo geral do trabalho foi alcançado com satisfação, visto que foi possível aplicar as técnicas da Manutenção Centrada na Confiabilidade no equipamento proposto. A turbina a vapor objeto do estudo mostrou-se eficaz em sua função, atendendo as condições de serviço com confiabilidade adequada.

As ferramentas Weibull++ e Blocksim do *software Syntesis Plataform*, versão 10, utilizadas para análise das falhas, e estruturação em diagramas de bloco de confiabilidade RBD (*Reliability Block Diagram*) foram satisfatórias, atendendo as necessidades do problema. Os resultados obtidos validam o modelo teórico de que a confiabilidade do sistema depende de sua configuração, podendo ser melhorada pela disposição em paralelo dos componentes. A dificuldade de levantamento e interpretação de dados pode ter levado à uma pequena distorção nos valores dos resultados apresentados, o que evidencia a importância da qualidade dos dados de entrada na formulação do problema.

A redundância no sistema, configuração em paralelo, representa uma elevação do custo de manutenção e equipamentos reservas. Entretanto é justificado pela necessidade de disponibilidade do setor de Ustulação e por consequência dos equipamentos que o compõem. Entende-se que a observância do custo de manutenção, custo de produção e custo total em função da confiabilidade seja um indicador importante para decisões estratégicas. Contudo, não foi possível a elaboração de tal informação para este trabalho devido à escassez de dados.

A investigação da falha pelo método de árvore de falhas permitiu a elaboração de ações corretivas e preventivas. Melhoria das condições de serviço e monitoramento do equipamento serão primordiais para a diminuição de manutenções corretivas.

Os resultados de confiabilidade da turbina não se fazem genéricos a equipamento similar devido a influência das condições de trabalho, específicas do local de operação, e das técnicas de uso no desgaste do equipamento. Sugere-se a revisão das atividades previstas no plano de manutenção preventiva com foco em lubrificação e medição de vibração a uma periodicidade de semanal. Sugere-se também a realização de inspeção e avaliação das condições do equipamento a cada cinquenta dias, verificando a necessidade de substituição de componentes.

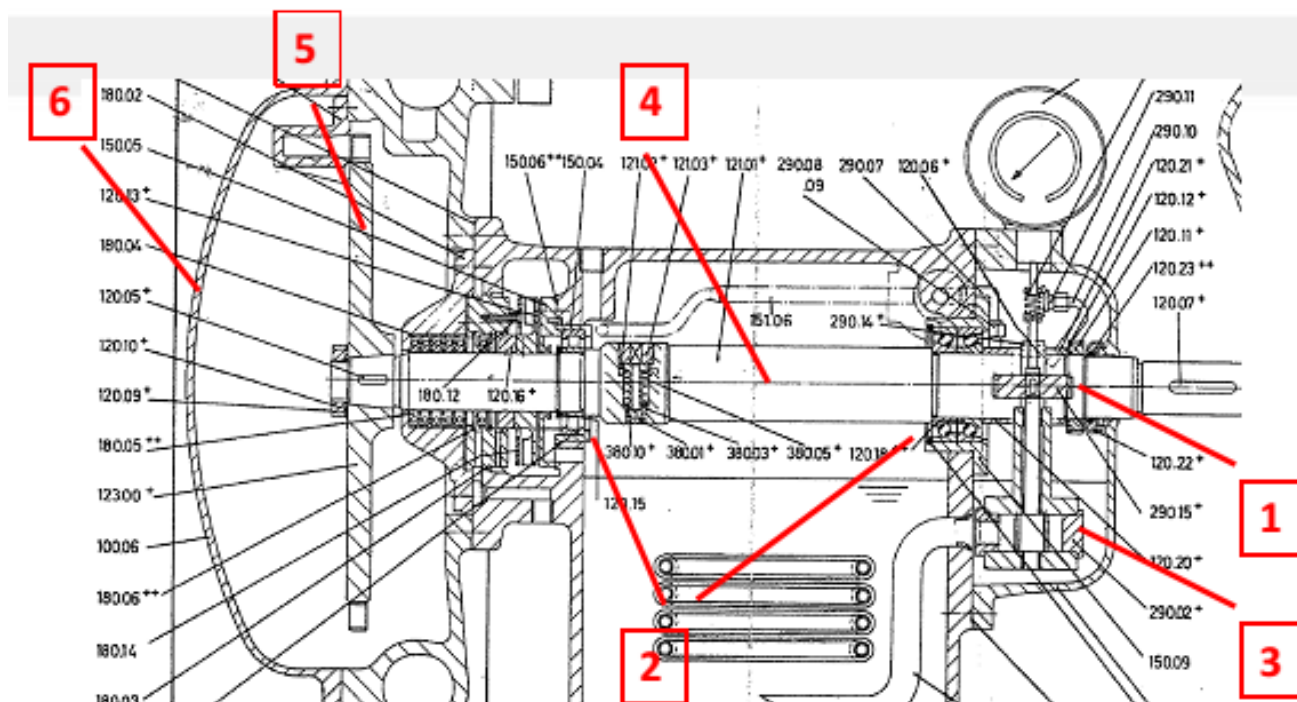
Espera-se que as contribuições deste trabalho permitam melhor estratégia de manutenção para o equipamento, permitindo melhoria de performance do mesmo e aumento de confiabilidade. Que a metodologia de análise por simulações em *software* adequado, sirva de parâmetro para cálculo de confiabilidade de outros maquinários da empresa.

REFERÊNCIAS

- ABRAMAN - Associação Brasileira de Manutenção e Gestão de Ativos. (27 de fevereiro de 2016). Fonte: <http://www.abraman.org.br/>
- Alves, L. H. (2011). Notas de Aula: Gestão da Manutenção. *Universidade Federal de Juiz de Fora*, (p. 163).
- Análise estratégica da manutenção de uma linha de fabricação metal-mecânica baseada em cálculos de confiabilidade de equipamentos. (2007). *Revista GEPROS. Gestão da Produção, Operações e Sistemas*, 97-98.
- ASM HANDBOOK. (2002). *Failure Analysis and Prevention, vol 11*.
- Bran, R., & Souza, Z. d. (1969). *Máquinas de Fluxo: turbinas, bombas e ventiladores*. Rio de Janeiro: AO LIVRO TÉCNICO S.A.
- Costa, M. A. (2013, p.104). *Gestão Estratégica de Manutenção: uma oportunidade para melhorar o resultado operacional*. Juiz de Fora: Universidade Federal de Juiz de Fora.
- Documento Nacional 2013*. (18 de fevereiro de 2016). Fonte: ABRAMAN: <http://www.abraman.org.br/Arquivos/403/403.pdf>
- Fogliatto, F. S., & José Luis Duarte Ribeiro. (2011). *Confiabilidade e Manutenção Industrial*. Rio de Janeiro: Elsevier: ABEPRO.
- Kardec, A., & Júlio Nascif. (2009). *Manutenção Função Estratégica*. Rio de Janeiro: Qualitymark.
- Macintyre, A. J. (1997). *Equipamentos Industriais e de Processo*. Rio de Janeiro: LTC.
- Miguel, P. A. C. et al. (2010). *Metodologia de Pesquisa em Engenharia de Produção e Gestão de Operações*. Rio de Janeiro: Elsevier.
- Monchy, F. (1987). *A Função Manutenção*. São Paulo: DURBAN.
- Moubray, J. (1997). *Reliability Centered Maintenance*.
- Neto, L. d., & Tavares, D. M. (2015). Aplicabilidade da MCC em uma Empresa de Mineração. *XXXV Encontro Nacional de Engenharia de Produção*.
- Otani, M., & Machado, W. V. (2008). A Proposta de Desenvolvimento de Gestão da Manutenção Industrial na Busca da Excelência ou Classe Mundial. *Revista Gestão Industrial*, 01-16.
- Pereira, M. J. (2011). *Engenharia de Manutenção: teoria e prática*. Rio de Janeiro: Ciência Moderna.

- Rosa, E. B. (2006, p. 530). *Indicadores de Desempenho e Sistema ABC - O uso de indicadores para uma gestão eficaz do custeio de atividades de manutenção*. São Paulo: Universidade de São Paulo.
- Sellito, M. A., Borchardt, M., & Araújo, D. R. (23 de outubro de 2002). Manutenção Centrada em Confiabilidade. Aplicando uma Abordagem Quantitativa. *XXII Encontro Nacional de Engenharia de Produção*, p. 8.
- Simões, J. A. (2011, p.168). *Indicadores de Performance em manutenção industrial. Utilização, valor e disponibilidade de informação*. Coimbra: Universidade de Coimbra.
- Siqueira, I. P. (2005). *Manutenção Centrada na Confiabilidade - Manual de Implementação*. Qualitymark.
- Xenos, H. G. (1998). *Gerenciando a Manutenção Produtiva*. Belo Horizonte: Editora de Desenvolvimento Gerencial.

ANEXO A – VISTA EM CORTE LONGITUDINAL DA TURBINA



1 - Engrenagem de acionamento da bomba de óleo
2 - Mancais
3 - Bomba de óleo

4 - Eixo
5 - Rotor
6 - Voluta

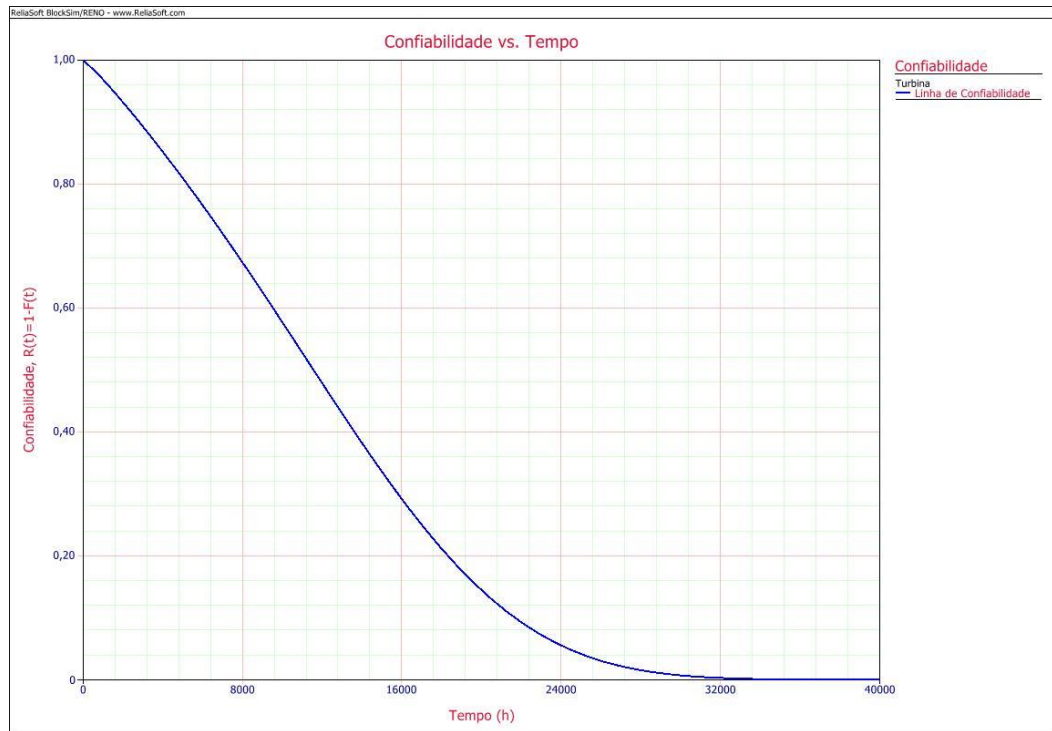
ANEXO B – DADOS DE CONFIABILIDADE DA TURBINA

Figura 28. Função Confiabilidade da turbina a vapor. Fonte: resultado de simulação pela ferramenta *BlockSim* do software *Synthesis Platform*.

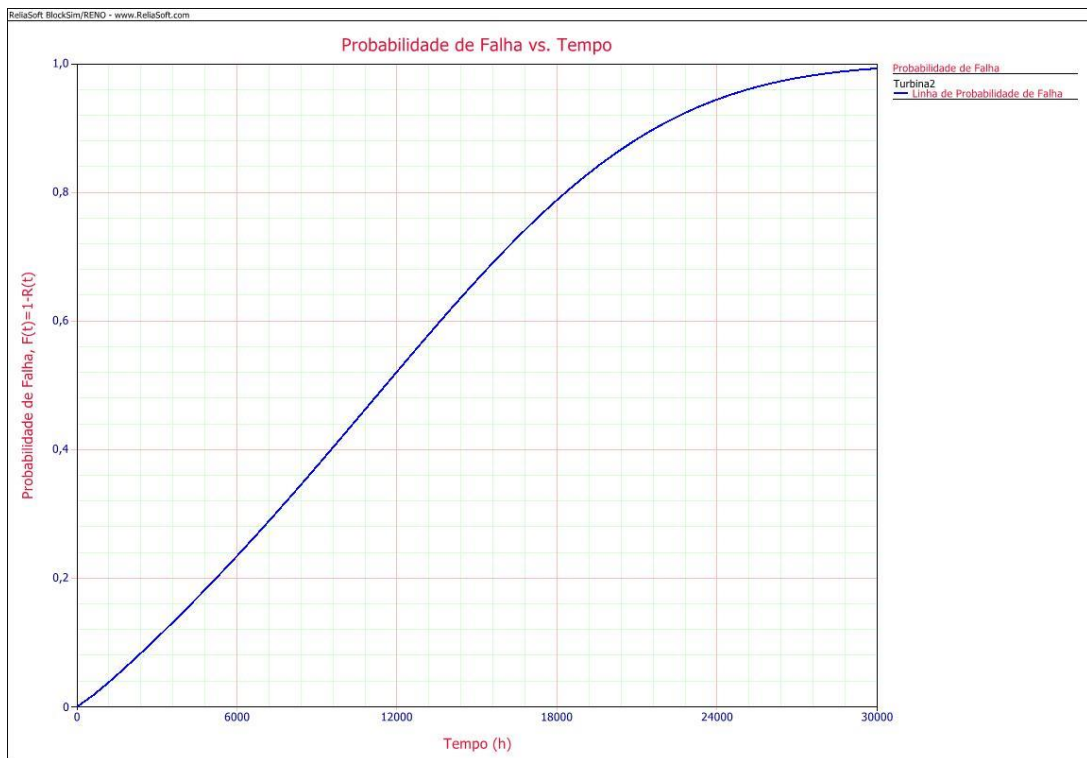


Figura 29. Função Probabilidade de falha da turbina a vapor. Fonte: resultado de simulação pela ferramenta *BlockSim* do software *Synthesis Platform*.

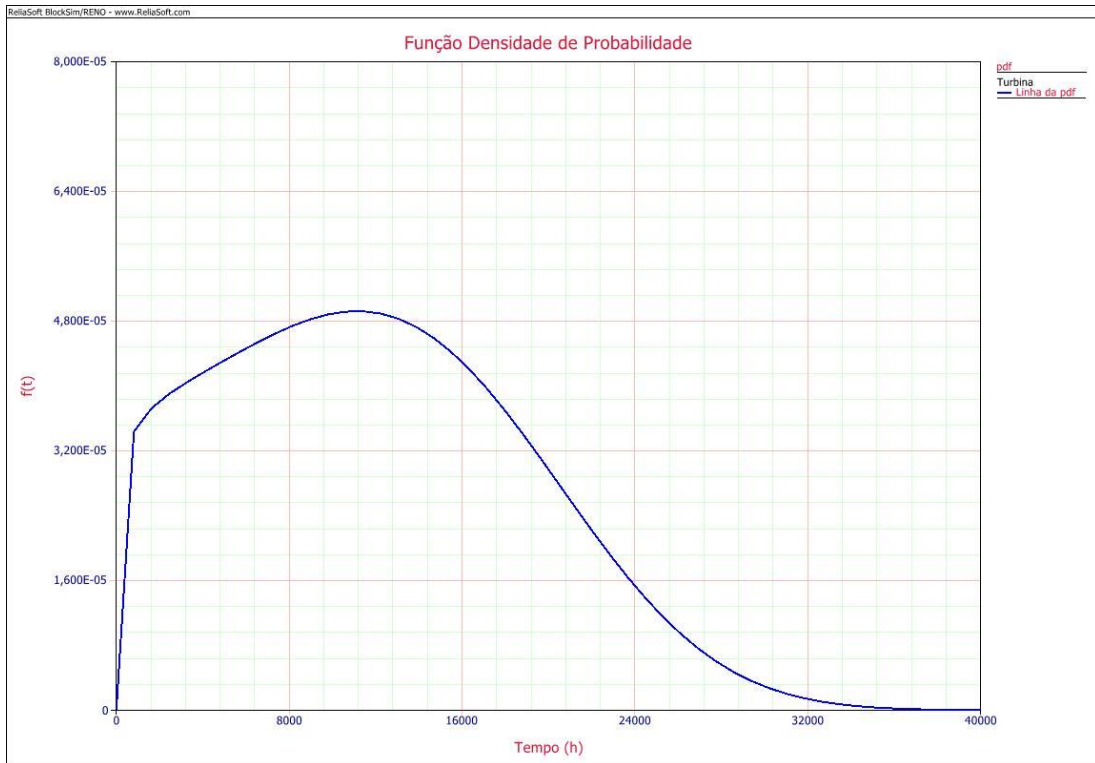


Figura 30. Função densidade de probabilidade da turbina a vapor. Fonte: resultado de simulação pela ferramenta BlockSim do software Synthesis Plataform

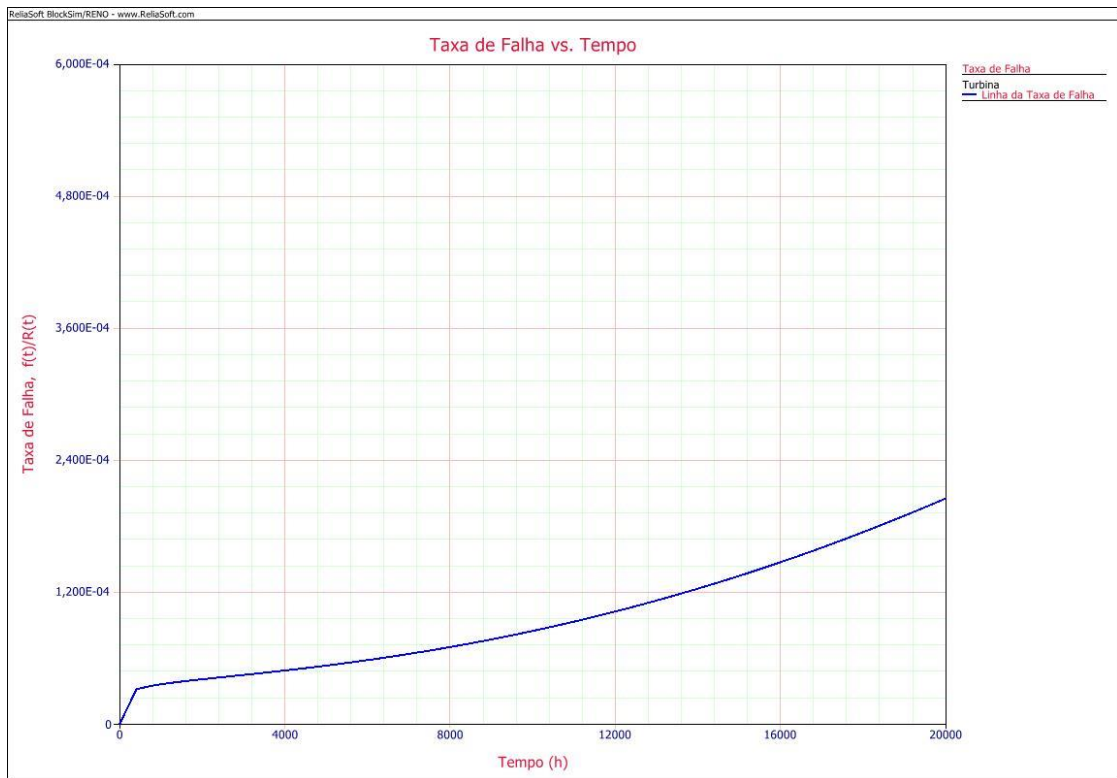


Figura 31. Função Taxa de falha da turbina a vapor. Fonte: resultado de simulação pela ferramenta BlockSim do software Synthesis Plataform

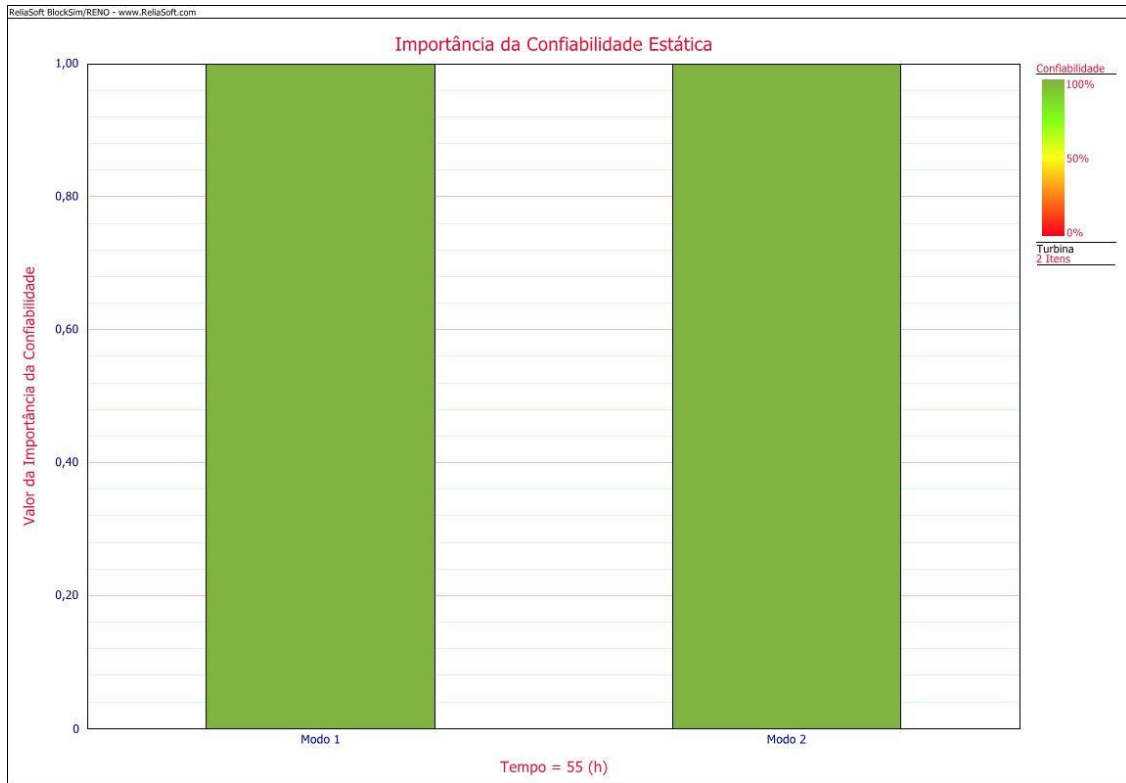


Figura 32. Importância de confiabilidade estática da turbina a vapor para 55 horas. Fonte: resultado de simulação pela ferramenta BlockSim do software Synthesis Platform

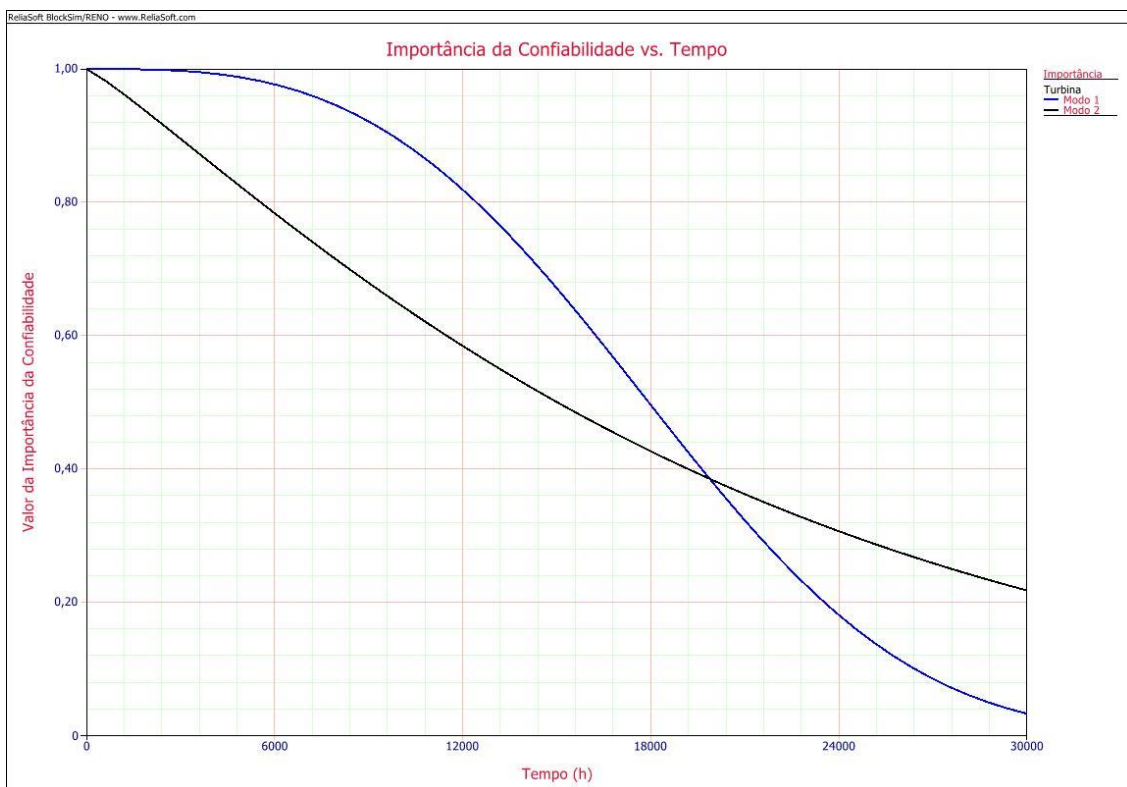


Figura 33. Importância de confiabilidade em função do tempo da turbina a vapor. Fonte: resultado de simulação pela ferramenta BlockSim do software Synthesis Platform

ANEXO C – DADOS DE CONFIABILIDADE DA CALDEIRA

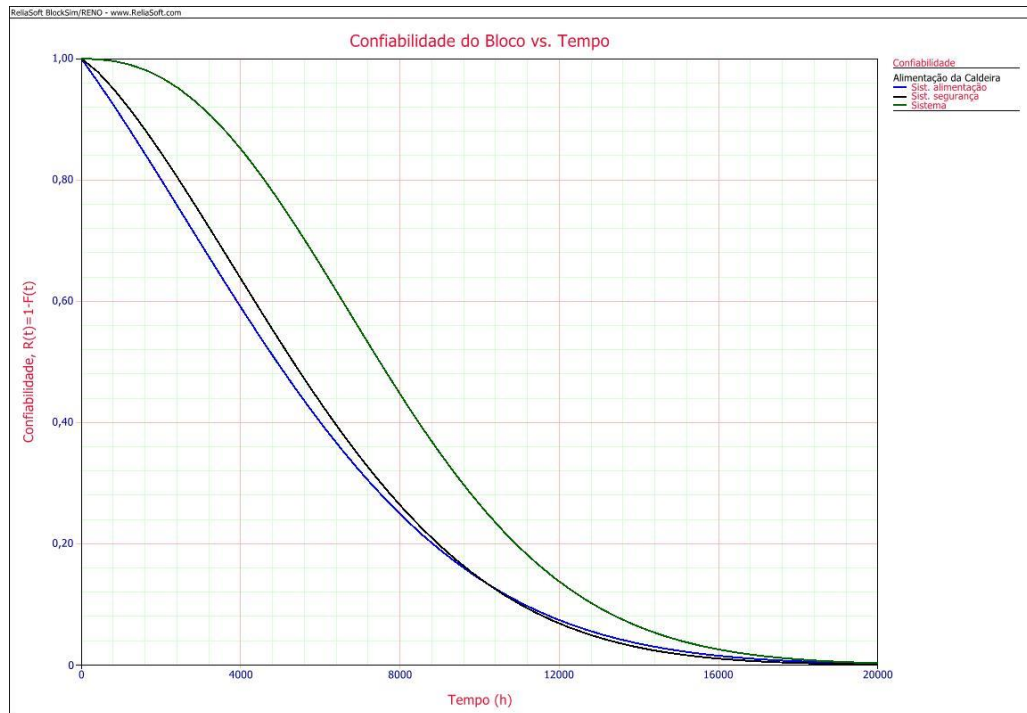


Figura 34. Função Confiabilidade do sistema de alimentação da caldeira. Fonte: resultado de simulação pela ferramenta BlockSim do *software* Synthesis Plataform.

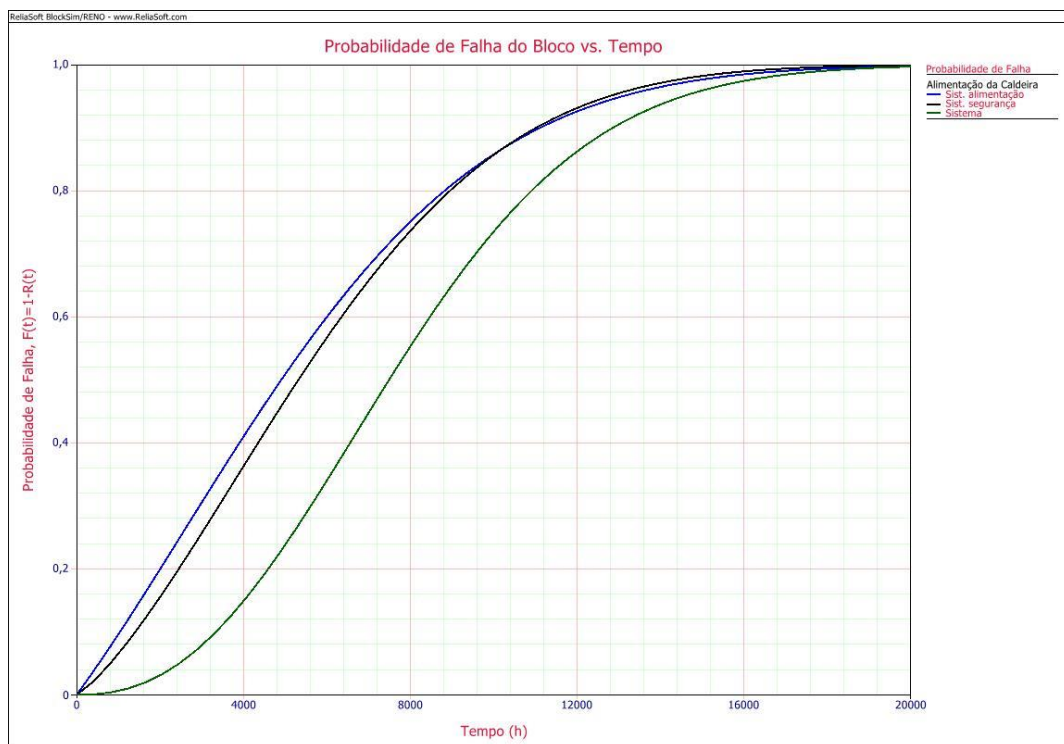


Figura 35. Função Probabilidade de falha do sistema de alimentação da caldeira. Fonte: resultado de simulação pela ferramenta BlockSim do *software* Synthesis Plataform.

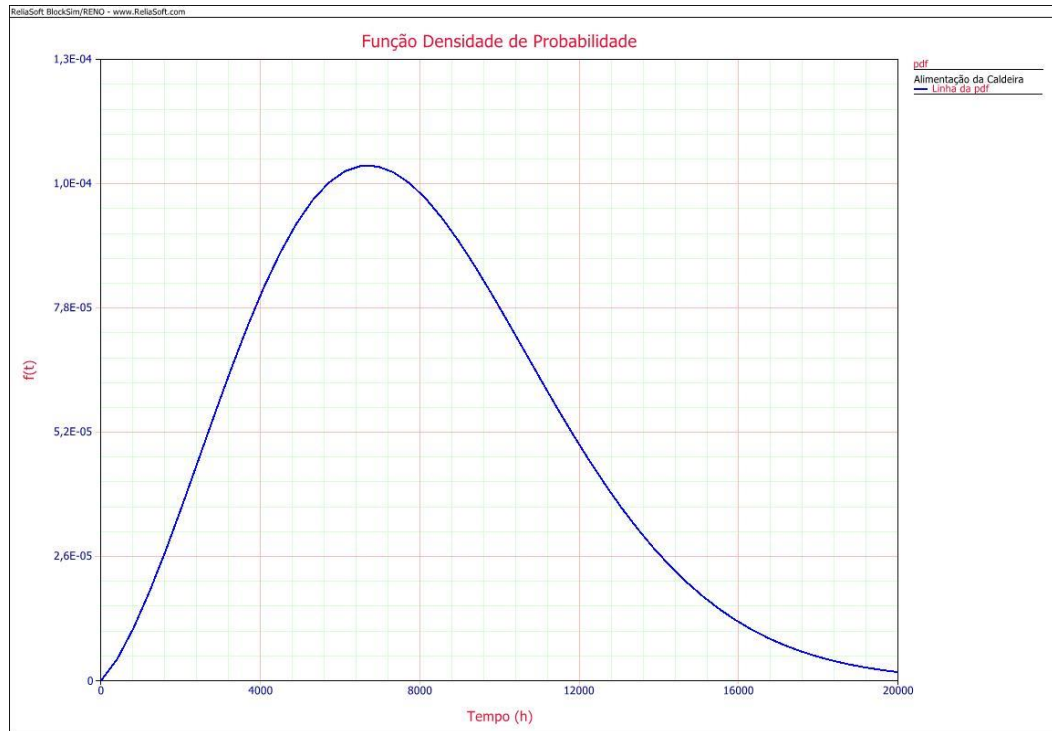


Figura 36. Função densidade de probabilidade do sistema de alimentação da caldeira. Fonte: resultado de simulação pela ferramenta BlockSim do software Synthesis Platform.



Figura 37. Importância de confiabilidade estática do sistema de alimentação de água da caldeira para 55 horas. Fonte: resultado de simulação pela ferramenta BlockSim do software Synthesis Platform.

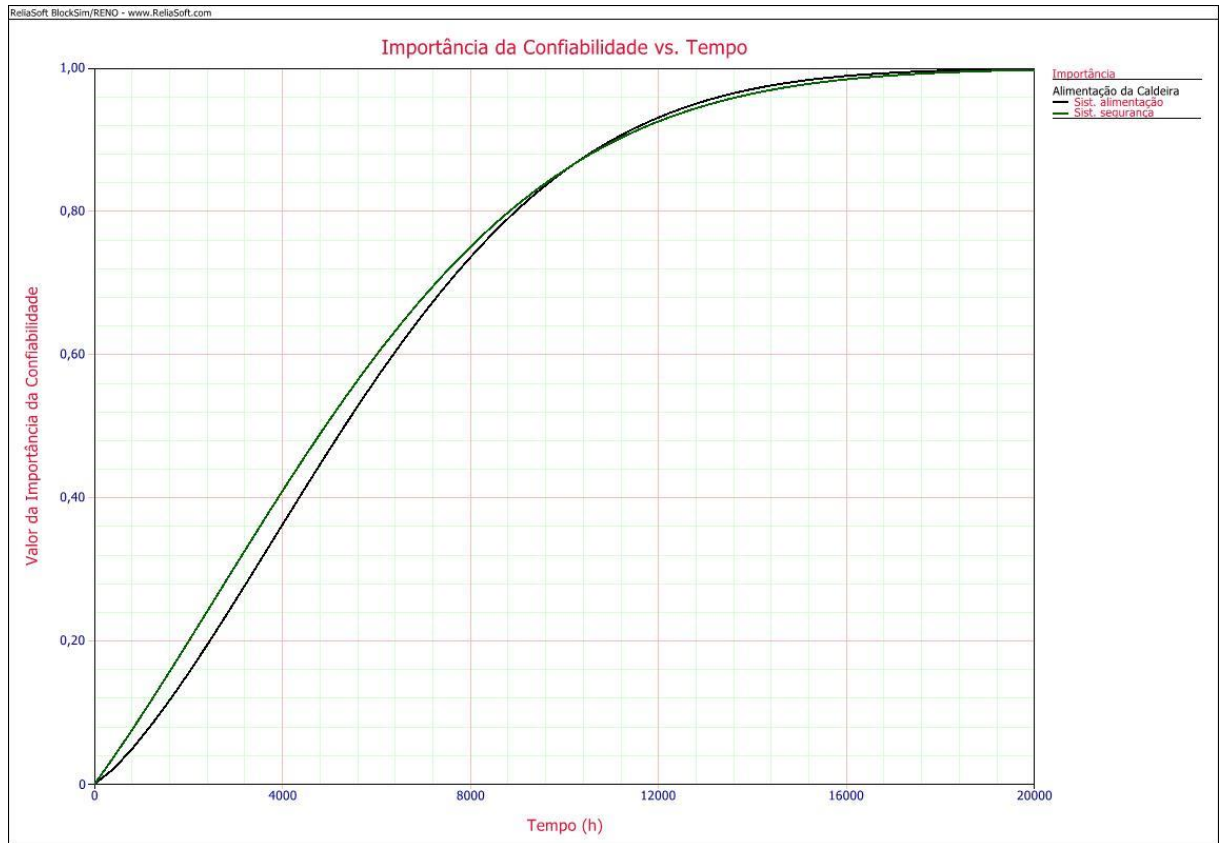


Figura 38. Importância de confiabilidade em função do tempo do sistema de alimentação de água da caldeira.

ANEXO D – TERMO DE AUTENTICIDADE



UNIVERSIDADE FEDERAL DE JUIZ DE FORA
FACULDADE DE ENGENHARIA

Termo de Declaração de Autenticidade de Autoria

Declaro, sob as penas da lei e para os devidos fins, junto à Universidade Federal de Juiz de Fora, que meu Trabalho de Conclusão de Curso do Curso de Graduação em Engenharia Mecânica é original, de minha única e exclusiva autoria. E não se trata de cópia integral ou parcial de textos e trabalhos de autoria de outrem, seja em formato de papel, eletrônico, digital, áudio-visual ou qualquer outro meio.

Declaro ainda ter total conhecimento e compreensão do que é considerado plágio, não apenas a cópia integral do trabalho, mas também de parte dele, inclusive de artigos e/ou parágrafos, sem citação do autor ou de sua fonte.

Declaro, por fim, ter total conhecimento e compreensão das punições decorrentes da prática de plágio, através das sanções civis previstas na lei do direito autoral¹ e criminais previstas no Código Penal², além das cominações administrativas e acadêmicas que poderão resultar em reprovação no Trabalho de Conclusão de Curso.

Juiz de Fora, ____ de _____ de 20____.

NOME LEGÍVEL DO ALUNO (A)

Matrícula

ASSINATURA

CPF

¹ LEI N° 9.610, DE 19 DE FEVEREIRO DE 1998. Altera, atualiza e consolida a legislação sobre direitos autorais e dá outras providências.

² Art. 184. Violar direitos de autor e os que lhe são conexos: Pena - detenção, de 3 (três) meses a 1 (um) ano, ou multa.

ANEXO E – DECLARAÇÃO DA EMPRESA

Declaro para os devidos fins, que a acadêmica Edilene Silva Neves, estagiária na Votorantim Metais Zinco – Juiz de Fora, possui autorização para divulgar o nome da empresa bem como dados não confidenciais na elaboração de seu Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Faculdade de Engenharia da Universidade Federal de Juiz de Fora, como requisito parcial para a obtenção do título de Engenheira Mecânica.

Juiz de Fora, julho de 2016.

Responsável da Empresa
Marco Antônio Alves Teixeira